



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement devant

l'Université de Lorraine

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Spécialité : Biologie et écologie des forêts et agrosystèmes

par

Anaïs DENARDOU-TISSERAND

Le 8 février 2019

Changements du stock de bois sur pied des forêts françaises

Description, analyse et simulation sur des horizons temporels pluri-décennal (1975 - 2015) et séculaire à partir des données de l'inventaire forestier national et de statistiques anciennes

Directeur de thèse : **Jean-Luc Dupouey**

Co-directeur de thèse : **Jean-Daniel Bontemps**

Jury

M. Pascal MARTY, professeur, ENS Lyon

M. Nicolas PICARD, directeur de recherche, FAO, Italie

M. Olivier BOURIAUD, professeur, Université de Suceava, Roumanie

M. Gerald KAENDLER, chercheur, FVA, Freiburg, Allemagne

Mme Ingrid SEYNAVE, ingénieur de recherche, INRA

M. Jean-Luc DUPOUEY, directeur de recherche, INRA

M. Jean-Daniel BONTEMPS, directeur de recherche, IGN

Mme Miriam BUITRAGO, ingénieur, ADEME

Rapporteur

Rapporteur

Examinateur

Examinateur

Examinateur

Directeur de thèse

Co-directeur de thèse

Membre invité

UMR A 1434 - SILVA 54280 Champenoux, France

Laboratoire d'Inventaire Forestier (LIF), IGN, 14 rue Girardet, 54000 Nancy, France



SiReNa



La Région
Lorraine



**Changements du stock de bois sur pied
des forêts françaises**

**Description, analyse et simulation sur des horizons temporels pluri-
décennal (1975 - 2015) et séculaire à partir des données
de l'inventaire forestier national et de statistiques anciennes**

Changes in the French forest growing stock

**Description, analysis and simulation over a pluri-decennial (1975 -
2015) to centennial time period based on national forest inventory
data and ancient statistics**

A mon père

Et à ma cousine, Claire

Remerciements

La thèse est tout sauf un travail solitaire et je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont, de près ou de loin, permis d'arriver au bout de ce périple.

En premier lieu, je tiens à remercier l'IGN et l'INRA pour leur accueil au sein du Laboratoire d'Inventaire Forestier (LIF) et de l'UMR SILVA. Je tiens à remercier tout particulièrement Jean-Christophe Hervé, ancien directeur et fondateur du LIF, pour m'avoir accueillie au sein de son laboratoire. Ses conseils ont été d'une grande aide pour l'avancée de cette thèse. Il nous a malheureusement quittés trop tôt mais je garderai en mémoire l'image d'un homme brillant et passionné.

Merci à l'ADEME et la Région Lorraine d'avoir soutenu et financé ce projet ainsi qu'au LabEx ARBRE pour son aide financière.

Cette thèse je la dois principalement à mes deux directeurs de thèse. Je tiens à remercier Jean-Luc Dupouey pour avoir accepté de m'encadrer sur ce sujet et m'avoir fait confiance. Merci pour ses conseils et son appui scientifique. Je pense, et j'espère, avoir beaucoup appris à ses côtés. Je voudrais également remercier Jean-Daniel Bontemps, mon co-directeur de thèse, qui m'a donné l'opportunité de travailler sur ce vaste sujet. Merci pour sa disponibilité et son soutien. Son aide et son perfectionnisme m'ont permis de franchir la ligne d'arrivée de ce long marathon qu'est la thèse.

Merci à tous les membres de mon comité de thèse pour le temps qu'ils ont accordé à mes travaux, leurs idées et leurs conseils : Xavier Rochel, Patrick Vallet et Miriam Buitrago.

Ce travail n'aurait pas pu être mené à bien sans l'aide de certains membres de l'IGN qui m'ont aidée tout au long de mon travail : Jean Bir, François Morneau, Cedric Duprez, Stephanie Wurpillot, Antoine Colin et Claire Bastick. Les données de l'IGN sont un véritable casse-tête et doivent être manipulées avec précaution. Sans vous, il ne m'aurait pas été possible de les utiliser.

Un grand merci à tous mes collègues du LIF qui m'ont portée et supportée tout au long de ces années. Je tiens à remercier tout particulièrement Timothée Audinot pour sa bonne humeur permanente et son aide à travers son projet tuteuré et son stage de master 2. Sans ce travail effectué, il aurait été beaucoup plus difficile d'avancer dans ma thèse. A toi maintenant d'arriver au bout de la tienne. Bon courage !

Je voudrais également remercier la 136^{ème} FP. Avec vous j'ai appris à travailler mais aussi à faire grandir « l'esprit-co ». Un merci spécial à mes co' de GDP. Je vous dois beaucoup. A très vite pour de nouvelles aventures (un peu moins studieuses) !

Je souhaiterais aussi remercier les fifons, pour leur folie et leur passion de la forêt. Les deux étant très contagieuses.

Merci également à tous ceux qui, de près ou de loin, ont rendu ces trois années à Nancy sympathiques.

Enfin, et surtout, merci à ma famille, toujours présente dans les bons et les mauvais moments. Merci à mes parents pour votre amour, votre soutien et votre force. Vous êtes pour moi un pilier et un exemple à suivre. Merci à ma Mamino, toujours à l'écoute et pleine d'amour, même malgré la distance. Merci à mes frères et sœur, Justine, Arthur et Jules, mes camarades de vie, vous êtes les meilleurs ! Merci à Arno, la valeur ajoutée à la famille. Merci aussi à mes oncles, tantes et cousins. Vous voir, vous et vos familles, est toujours un plaisir. Un grand merci aussi à mon parrain Bruno et ma marraine Corinne pour votre amour et votre sourire permanent.

Articles et colloque

Articles

1. DENARDOU, Anaïs, HERVÉ, Jean-Christophe, DUPOUEY, Jean-Luc, BIR, Jean, AUDINOT, Timothée, BONTEMPS, Jean-Daniel. L'expansion séculaire des forêts françaises est dominée par l'accroissement du stock sur pied et ne sature pas dans le temps. *Revue Forestière Française*, 2017, vol. 69, no 4-5, p.319-339.
2. DENARDOU, Anaïs, DUPOUEY, Jean-Luc, HERVE, Jean-Christophe, BIR, Jean, MORNEAU, François, BONTEMPS, Jean-Daniel. Unprecedented contemporary (1976-2014) increase in the growing stock of French forests is persistent and dominated by private broadleaved forests. *European Journal of Forest Research* (soumis)
3. BONTEMPS, Jean-Daniel, HERVE, Jean-Christophe, DENARDOU, Anaïs. Une partition idéalisée et régionalisée de la composition en espèces ligneuses des forêts françaises pour l'analyse de leurs ressources en bois. *Ecoscience* (soumis)
4. DENARDOU, Anaïs, DUPOUEY, Jean-Luc, HERVE, Jean-Christophe, AUDINOT, Timothee, BONTEMPS, Jean-Daniel. Reconstituted increase in the growing stock of French forests since 1850 reaches +300% and requires non-saturating forest densification assumption. (en préparation)

Colloque

DENARDOU, Anaïs. Long-term expansion in the growing stock of the French forests: analysis and modelling. 18 au 22 septembre 2017, colloque IUFRO – 125^e anniversaire (Fribourg, Allemagne), session “Contributions of Forest Mensuration and Modelling over 125 years”.

Guide de lecture

Après une introduction présentant le contexte et les objectifs de nos recherches, une deuxième partie permet de présenter les données utilisées (données de l'IFN et statistiques anciennes).

La partie III, premier chapitre d'analyse, est une étude de cette expansion en surface et surtout en stock sur pied. L'objectif a été de i) comprendre les variations de ces expansions à la fois au niveau temporel, au niveau géographique et selon les types de propriété et de composition en essences, ii) d'étudier la dynamique temporelle de ces expansions et de vérifier si l'on observe l'apparition d'une saturation, iii) d'étudier les mécanismes de l'expansion en stock sur pied. Ce chapitre présente deux articles écrits sur cette étude. Ces articles font partie intégrante du corps du chapitre.

La partie IV présente une étude des mécanismes des changements de stock sur pied des forêts françaises. Elle se focalise sur l'analyse des flux de surface terrière afin de comprendre leur relation avec l'expansion du stock et d'identifier des compartiments de la forêt française, homogènes du point de vue de leur dynamique, responsable de l'augmentation du stock. La partie V présente à la fois un essai d'estimation du stock sur pied au début du XX^{ème} siècle ainsi que des simulations de la dynamique d'augmentation du stock depuis 1850.

Ces chapitres sont suivis d'une partie de discussion et conclusion générale sur les études précédemment présentées.

Abréviations couramment utilisées

Termes généraux

IFN : Inventaire Forestier National

FFN : Fonds Forestier National

RTM : Restauration des Terrains de Montagne

Données IFN

AM : ancienne méthode (données IFN antérieures à 2005)

NM : nouvelle méthode (données IFN postérieures à 2005)

Termes géographiques

GRECO : Grandes Régions Ecologiques

SER : sylvoécorégions

Al : Alpes

CN : Centre-Nord semi-océanique

Co : Corse

GE : Grand-Est semi-continentale

GO : Grand Ouest cristallin et océanique

Ju : Jura

MC : Massif Central

Me : Méditerranée

Py : Pyrénées

SO : Sud-Ouest océanique

Vo : Vosges

Types de propriété

D : forêts domaniales

C/AFPS : autres forêts publiques relevant du régime forestier

P : forêts ne relevant pas du régime forestier

Essences

AA : sapin (*Abies alba*)

CB : charme (*Capinus betulus*)

CS : châtaignier (*Castanea sativa*)

FE : Frêne (*Fraxinus excelsior*)

FS : Hêtre (*Fagus silvatica*)
LD : mélèze (*Larix decidua*)
P : pins (*Pinus*)
PA : épicéa (*Picea abies*)
PM : douglas (*Pseudotsuga menziesii*)
PN : pin noir (*Pinus nigra*)
PP : pin maritime (*Pinus pinaster*)
PS : pin sylvestre (*Pinus silvestris*)
QR : chêne pédonculé (*Quercus robur*)
QPe : chêne sessile (*Quercus petraea*)
QPu : chêne pubescent (*Quercus pubescens*)
QI : chêne vert (*Quercus ilex*)

DF : divers feuillus
DR : divers résineux

Toute strate définie par une GRECO et un type de propriété est définie par :

GRECO.propriété (ex : AL.P pour les forêts privées des Alpes)

De même, toute strate définie par une GRECO, un type de propriété et une essence est définie par :

GRECO.propriété.essence (ex : GO.D.QPe pour les chênes sessile des forêts domaniales du Grand-Ouest cristallin et océanique)

Variables dendrométriques

C0 : Circonférence à la base

C13 : Circonférence à 1,30 m

D13 : diamètre à 1,30 m

EC : épaisseur d'écorce de l'arbre

IR5 : accroissement radial individuel cumulé sur les 5 dernières années

IR10 : accroissement radial individuel cumulé sur les 10 dernières années

IRN : accroissement radial individuel cumulé sur les N dernières années

Données peuplement

IMPES : donnée « importance-essence »

TCLR : taux de couvert libre relatif

Flux

CR : croissance

Mt : mortalité

Pt : prélèvement

Rt : recrutement

CR_G1 : croissance rapportée à la surface terrière initiale

Mt_G1 : mortalité rapportée à la surface terrière initiale

Pt_G1 : prélèvement rapporté à la surface terrière initiale

Rt_G1 : recrutement rapporté à la surface terrière initiale

Rt_S1 : recrutement rapporté à la surface initiale

Var_surf_S1 : variations de surface rapportée à la surface initiale

Unités

Mx : 10^6 x (x : ha ou m^3)

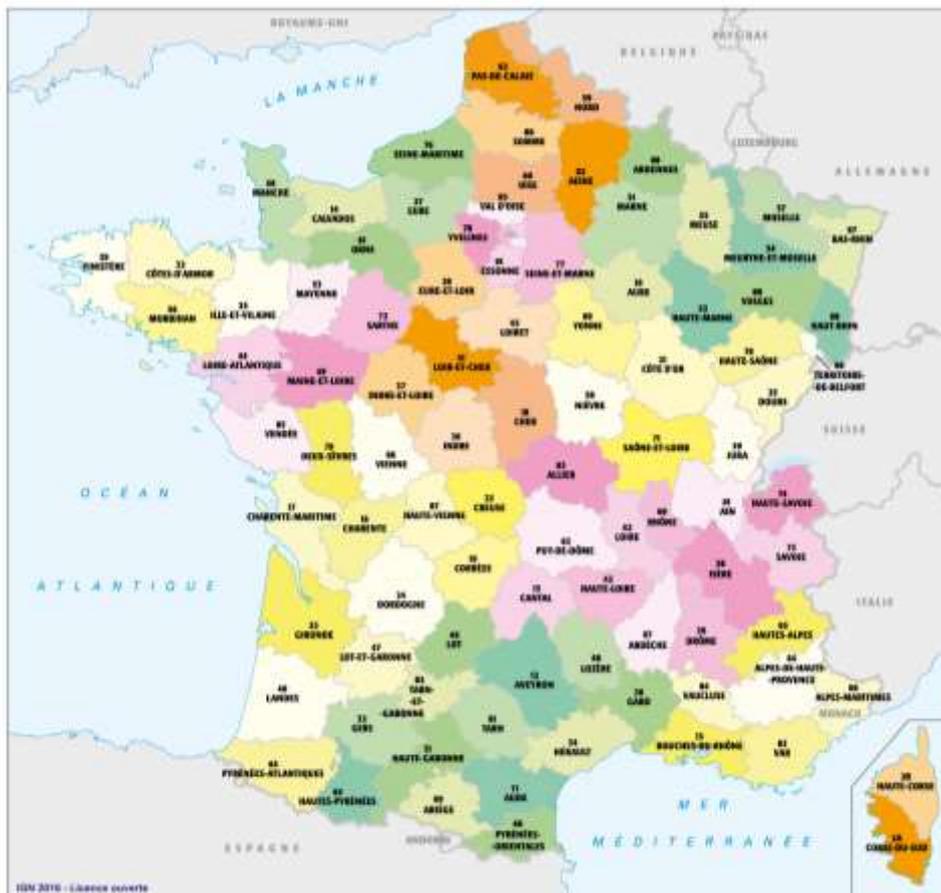
kx : 10^3 x (x : ha ou m^3)

Autres

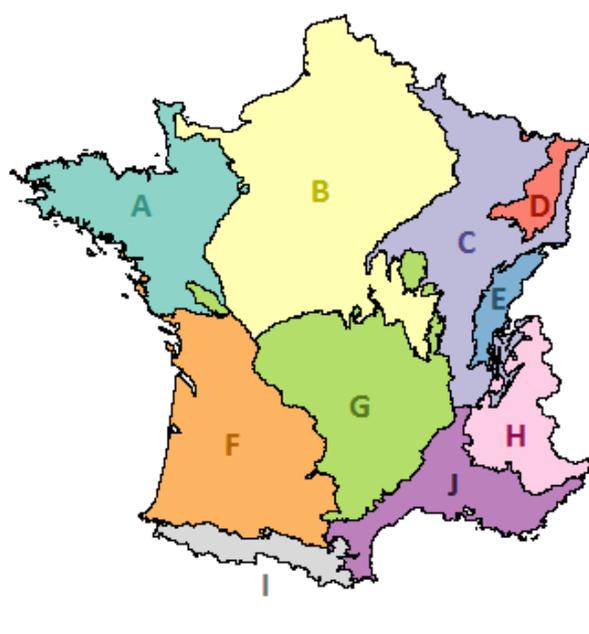
IE : Intensité d'expansion

DPE : individus département x propriété x essence

Départements et GRECO



Carte des départements. Disponible en ligne : <http://education.ign.fr/primaire/fonds-de-cartes>



- A GO Grand Ouest cristallin et océanique
- B CN Centre Nord semi-océanique
- C GE Grand Est semi-continentale
- D Vo Vosges
- E Ju Jura
- F SO Sud-ouest océanique
- G MC Massif central
- H Al Alpes
- I Py Pyrénées
- J Me Méditerranée
- K Co Corse

Carte des Grandes Régions Ecologiques (GRECO)

Table des matières

Remerciements	7
Articles et colloque	11
Guide de lecture	13
Abréviations couramment utilisées	15
Table des matières	21
I - Introduction	31
1 Contexte	33
1.1 L'expansion surfacique des forêts et le concept de transition forestière	33
1.2 La transition forestière en France	34
1.3 Les facteurs de changements de surface forestière en France depuis le début du XX ^{ème} siècle	36
1.3.1 Le boisement des landes de Gascogne (XIX ^{ème} siècle)	37
1.3.2 La Restauration des Terrains de Montagne (1860 – nos jours).....	37
1.3.3 Reboisements après-guerre (1918).....	38
1.3.4 Le Fonds Forestier National (1946-1999).....	38
1.3.5 Reboisements non FFN (1946-1999)	39
1.3.6 Déboisements en champagne (1950)	40
1.3.7 Boisements spontanés	40
2 L'évolution du stock de bois sur pied, un fait négligé de la théorie de la transition forestière	46
2.1 Une expansion plus rapide qu'en surface	46
2.2 Des enjeux politiques, écologiques et économiques.....	47
2.3 Les facteurs de changements de stock depuis le début du XX ^{ème} siècle ..	48
2.3.1 Augmentation de la productivité biologique	49
2.3.2 Des prélèvements en deçà de la production biologique	49
2.3.3 Conversion des taillis-sous-futaie (TSF) en futaie	53
2.3.4 Rôle des tempêtes majeures.....	53
2.3.5 Incendies de forêt, une contribution encore anecdotique	56
2.3.6 Les dépérissements, un effet ciblé difficile à quantifier	57
2.3.7 Conflits armés	58
2.3.8 Difficulté à quantifier l'impact des différents facteurs.....	58
3 Contribution des données IFN et des statistiques anciennes à l'analyse de la dynamique forestière	59
3.1 Données IFN.....	59

3.2	Statistiques anciennes	60
4	Lacunes identifiées.....	61
5	Objectifs de la thèse.....	62
II	Les données de surface et de stock de bois sur pied des forêts françaises issues de l'inventaire forestier national et de statistiques anciennes.....	65
1	Introduction	67
2	Présentation des données.....	67
2.1	L'inventaire forestier national	68
2.1.1	Méthodes d'inventaire et bases de données	68
2.1.2	La définition de la forêt et son évolution	70
2.1.3	L'opération d'inventaire	71
2.1.3.1	Ancienne méthode.....	71
2.1.3.2	Nouvelle méthode.....	72
2.1.3.3	Levés de terrain.....	73
2.2	Les statistiques anciennes.....	75
2.2.1	La statistique Daubrée	75
2.2.2	Les statistiques agricoles décennales de 1892 et 1929	77
2.3	Homogénéisation des données.....	77
3	Travaux préliminaires sur les données.....	81
3.1	Rattachement des départements aux GRECO	81
3.2	Etude du changement de surface entre ancienne et nouvelle méthode de l'IFN	84
3.2.1	Objectif	84
3.2.2	Méthode	84
3.2.3	Résultats	85
3.2.4	Conclusion.....	87
III	Caractérisation de l'expansion des forêts françaises.....	89
1	Introduction	91
2	Article 1	92
3	Article 2	115
4	Analyses complémentaires	150
4.1	Analyse de l'effet de l'interpolation et de l'extrapolation sur la lecture des tendances	150
4.1.1	Objectif	150
4.1.2	Matériel et méthodes	150
4.1.3	Résultats	151

4.1.4	Conclusion.....	152
4.2	Analyse de l'expansion forestière en fonction de l'altitude.....	152
IV	Analyse contextualisée des mécanismes d'expansion du stock de bois sur pied	161
1	Introduction, grands principes de l'analyse	163
1.1	Analyse du bilan de stock de bois en surface terrière.....	163
1.2	Une analyse contextualisée et hiérarchique	163
2	Analyses techniques préliminaires	166
2.1	Identification des compositions dominantes sur les surfaces des forêts françaises	166
2.1.1	Partition de la surface forestière en compositions dominantes sur la nouvelle méthode.....	168
2.1.2	Essai d'homogénéisation des informations de composition en essence des points d'inventaire entre l'ancienne et la nouvelle méthode d'inventaire.....	173
2.2	Comparaison des prélèvements entre ancienne et nouvelle méthode	175
3	Matériel et méthodes.....	176
3.1	Choix du matériel d'étude	176
3.2	Calcul des flux de bois en surface terrière	179
3.2.1	Flux de Croissance et recrutement en surface terrière.....	179
3.2.2	Flux de Mortalité en surface terrière.....	181
3.2.3	Flux de prélèvement en surface terrière.....	182
3.2.4	Standardisation des flux de bois en taux démographiques	183
3.3	Représentation des flux de bois, problème des prélèvements négatifs	183
3.4	Analyse de la variabilité intra-strate des flux de bois en fonction de la taille des strates de l'analyse et sélection des individus	188
3.5	Stratégie d'analyse des flux.....	192
3.5.1	Analyse des corrélations au niveau des individus département x propriété.....	192
3.5.2	Analyse en composante principale et classification.....	193
3.5.2.1	Analyse en composante principale	193
3.5.2.2	Typologie des strates forestières fondée sur les flux de bois .	194
3.5.3	Information auxiliaire des profils diamétriques au niveau 2 de l'analyse	194
4	Résultats	196
4.1	Analyse de la corrélation entre les flux et l'expansion au niveau des individus définis par les départements et la propriété	196

4.2	Explorations préliminaires, analyse des diagrammes des flux.....	198
4.3	Analyse de la dynamique du stock de bois pour les strates définies par les GRECO et la propriété	201
4.3.1	Répartition de l'expansion du stock de bois, analyse de l'intensité d'expansion.....	201
4.3.2	Structuration des strates selon les flux de bois, analyse en composantes principales.....	202
4.3.2.1	Analyse de l'inertie	202
4.3.2.2	Interprétation des axes principaux.....	203
4.3.2.3	Apport des variables supplémentaires.....	204
4.3.2.4	Rôle de la stratification en propriété forestière et GRECO	207
4.3.3	Typologie des strates forestières fondée sur les flux de bois	211
4.3.4	Synthèse	217
4.4	Analyse de la dynamique des stocks de bois pour les strates définies par les facteurs GRECO x type de propriété x essence.....	218
4.4.1	Interprétation des axes.....	219
4.4.2	Typologie des strates forestières fondée sur les flux de bois	220
4.4.2.1	Observations générales.....	220
4.4.2.2	Description et analyse des facies dynamiques GPE	226
4.4.3	Synthèse	231
5	Discussion.....	235
5.1	Aspects méthodologiques.....	235
5.1.1	Flux de prélèvements de bois.....	235
5.1.2	Intérêt d'une analyse à deux niveaux hiérarchiques.....	235
5.1.3	Retour sur la mise en œuvre d'une méthode de classification	236
5.2	Aspects de la dynamique des forêts	236
5.3	Analyse des facies dynamiques.....	237
5.4	Compartiments de la forêt et systèmes de production responsable de l'expansion en stock des forêts.....	238
5.5	Conséquences pour la gestion et la mobilisation des bois.....	240
V - Analyse et simulation du stock de bois des forêts françaises sur un horizon séculaire		243
1	Introduction	245
1.1	Contexte	245
1.2	Objectifs.....	245
2	Estimation du stock au voisinage du début du XX ^{ème} siècle.....	246
2.1	Principe.....	246

2.2	Données utilisées.....	247
2.3	Partition de la forêt française	249
2.3.1	Principes généraux.....	249
2.3.2	Cas particuliers.....	250
2.4	Méthode de reconstitution du stock	251
2.5	Intervalle de confiance du stock au début du siècle pour les imputations conditionnelles fondées sur la moyenne	252
2.6	Résultats.....	253
2.6.1	Estimations du stock ancien fondées sur une imputation conditionnelle de la densité de stock moyenne	253
2.6.2	Estimations du stock ancien fondées sur une imputation conditionnelle de quantiles de la densité de stock.....	258
3	Reconstitution par simulation de l'évolution du stock sur pied depuis le début du XX ^{ème} siècle.....	260
3.1	Principe de la reconstitution historique des stocks par simulation	260
3.2	Reconstitution de la dynamique historique des surfaces	261
3.2.1	Surfaces forestières avant l'inventaire forestier national (1961)...	261
3.2.2	Surfaces forestières de la période couverte par l'inventaire forestier national.....	263
3.2.3	Adaptation et lissage de la chronologie des surfaces par ajustement d'un modèle de régression polynomial	263
3.3	Modélisation de l'évolution du volume forestier depuis 1850	267
3.3.1	Présentation du modèle	267
3.3.2	Modèles d'accumulation de stock net et paramétrisations associées	268
3.3.2.1	Modèle monomoléculaire	268
3.3.2.2	Modèle linéaire	269
3.3.2.3	Modèle de Hossfeld.....	269
3.3.2.4	Ajustement des paramètres des modèles	270
3.3.3	Conditions initiales et analyse de sensibilité.....	271
3.3.4	Mesure de la contribution à l'évolution en stock des forêts d'origine	272
3.4	Résultats des simulations	272
3.4.1	Sélection du modèle.....	272
3.4.2	Co-estimation des paramètres du modèle d'évolution du stock et des valeurs quantiles de stocks historiques de bois (modèle de Hossfeld).....	276
4	Interprétation et discussion	280
4.1	Aspects méthodologiques.....	280

4.2	Principaux résultats.....	280
4.2.1	Intensité d'augmentation séculaire du stock.....	280
4.2.2	Puits de carbone des forêts.....	280
4.2.3	Hypothèses explicatives à l'accélération d'accumulation de stock.....	281
4.2.4	Contribution des forêts nouvelles (depuis 1850) à l'expansion du stock de bois	284
VI	- Discussion et conclusion.....	291
1	Rappel du contexte et des objectifs.....	293
2	Approches méthodologiques	294
2.1	Les données	294
2.1.1	Les données IFN et le suivi de l'expansion forestière à la fois en surface et en stock sur pied	294
2.1.2	Les statistiques anciennes, des informations sur les forêts au début du XX ^{ème} siècle.....	295
2.1.3	Homogénéisation des données	296
2.2	Facteurs de partitionnement de la forêt	297
2.2.1	Variations spatiales (interdépartementales/ou inter-GRECO)	297
2.2.2	Type de propriété et information d'intensité de gestion	297
2.2.3	Type de composition et problème au niveau de l'homogénéisation des données.....	298
2.2.3.1	Etude qualitative et quantitative de l'expansion (partie III) et restriction de la période d'étude pour la partition prenant en compte les compositions.....	298
2.2.3.2	Etude de la dynamique (partie IV) et utilisation de la donnée de l'essence de l'arbre.....	299
2.2.3.3	Données de composition de la statistique Daubrée.....	299
2.2.4	Autres critères de partition envisagés	300
2.2.4.1	Critère d'altitude	300
2.2.4.2	Critère de structure forestière verticale.....	300
2.3	La méthode d'interpolation-extrapolation, indispensable pour une lecture continue de l'évolution de la surface et du stock sur pied	301
2.4	Calcul des flux et nécessité d'utiliser un bilan de surface terrière pour calculer les prélèvements	303
2.5	Estimation des stocks anciens et modélisation de l'évolution du stock depuis 1850	304
3	Synthèse des résultats principaux.....	305
3.1	Une expansion ancienne, plus forte en stock qu'en surface	305
3.2	Une expansion hétérogène dominée par les forêts privées	309

3.3	Des dynamiques d'expansion multiples	311
3.4	Une expansion séculaire qui a accéléré dans le temps et qui ne présente pas de saturation	315
3.5	L'expansion forestière en France et dans le monde	316
3.6	Le futur de l'expansion forestière	317
4	Conclusions et perspectives.....	319
4.1	Principales conclusions.....	319
4.2	Perspectives de recherche	320
4.2.1	Différenciation des forêts privées gérées	320
4.2.2	Généralisation de l'étude à l'ensemble de l'Europe.....	321
4.2.3	Analyse des flux par classe de diamètre	322
4.2.4	Etude des changements temporels des flux de bois	323
4.2.5	Améliorations nécessaires pour le modèle de reconstitution de l'expansion forestière en stock sur le long terme	323
4.2.5.1	Différenciations des forêts anciennes et récentes	323
4.2.5.2	Prise en compte des classes de diamètres	324
4.2.5.3	Utilisation des enquêtes Teruti pour une projection future.....	324
4.2.6	Approche multidisciplinaire de l'expansion pour mieux prédire les changements futurs et l'impact de l'expansion sur le changement climatique	324
	Bibliographie	327
	Annexes de la partie IV	347
	Annexe IV.1. Une partition idéalisée et régionalisée de la composition en espèces ligneuses des forêts françaises pour l'analyse de leurs ressources en bois	349
	Annexe IV.2. Essai d'homogénéisation des information de composition en essence au niveau des points d'inventaire entre l'ancienne (1976-2004) et la nouvelle méthode (2007-2012)	389
	Annexe IV.3. Comparaison des flux de prélèvement de bois des deux méthodes d'inventaire à l'échelle de grands domaines statistiques.....	394
	Annexe IV.4. Estimation dendrométrique permettant le calcul des flux de surface terrière	398
	Annexe IV.5. Cas particulier : non disponibilité des IR	401
	Annexe IV.6. Diagrammes des flux	402
	Annexe IV.7. Sélection des individus département x propriété.....	452
	Annexe IV.8. Sélection des individus département x propriété x essence .	455
	Annexe IV.9. Création des profils diamétriques.....	464
	Annexe IV.10. Détail des 7 facies identifiés au niveau 1 de l'analyse	465

Annexe IV.11. Détail des 14 facies identifiés au niveau 2 de l'analyse	466
Annexes de la partie V	473
Annexe V.1. Surface décrites dans les statistiques anciennes dont la même strate département x propriété x essence n'a pas été inventoriée par l'inventaire forestier.....	475
Annexe V.2. Reparamétrisation du modèle de Hossfeld	476
Annexe V.3. Analyse de la part des forêts récentes dans le stock sur pied actuel de la forêt française.....	477
Annexe V.4. Etude de l'évolution séculaire des prélèvements.....	478
Annexe de la partie VI	481
Annexe VI.1. Résultats du calcul des flux selon les différentes méthodes de calcul pour les forêts communales de la GRECO grand-ouest.....	483

I - Introduction

1 Contexte

1.1 L'expansion surfacique des forêts et le concept de transition forestière

C'est en 1992 que Mather introduit, pour la première fois, le concept de « transition forestière » (« forest(-area) transition »; Mather, 1992). Elle est alors définie pour un territoire donné comme le passage d'une période, pluriséculaire, de diminution nette de surface forestière à une période d'expansion nette en passant par ce qui est nommé le « minimum forestier » (**Figure 1.1**).

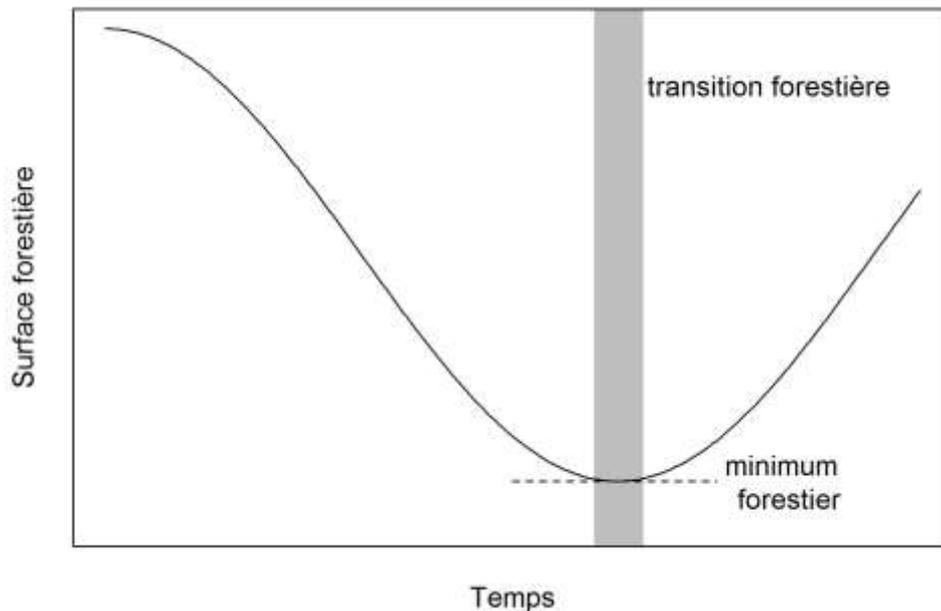


Figure 1.1. Schéma de la transition forestière (Selon Mather, 1992)

La transition forestière est donc un concept géographique de dynamique forestière lié à l'usage des sols. Ce phénomène se lit à l'échelle de grands territoires, généralement nationaux, et sur une large échelle de temps (de plusieurs décennies à plusieurs siècles) conduisant à ne pas se focaliser sur des phénomènes temporaires mais sur de véritables tendances durables.

Ce phénomène est aujourd'hui observable dans la plupart des pays développés (Meyfroidt et Lambin, 2011) et est relié à plusieurs causes parmi lesquelles :

- l'intensification de l'agriculture qui a permis de produire plus sur de plus petites surfaces résultant en une diminution de la surface agricole et l'abandon de terres.
- le passage d'une population rurale à une population urbaine diminuant la pression humaine sur certaines terres agricoles.

- la transition énergétique et le passage aux énergies fossiles (charbon, puis pétrole) diminuant l'utilisation du bois énergie.
- le changement de perception de la forêt et la prise en compte de son rôle environnemental et stratégique.

C'est en Europe que l'on trouve les transitions les plus anciennes, datées du début du XIX^{ème} siècle (Meyfroidt et Lambin, 2011) comme celle de la France (Kauppi *et al.*, 2006, Mather *et al.*, 1999). Ce phénomène semble toucher l'ensemble des pays développés. Ainsi, plus récemment, une transition forestière a été observée en Chine à la fin des années 70 (Kauppi *et al.*, 2006 ; Meyfroidt *et al.*, 2010 ; Zhang, 2000) ainsi qu'en Inde et au Vietnam autour dans les années 80 et 90 (Meyfroidt et Lambin, 2009 ; Singh *et al.*, 2014).

Entre 1990 et 2015, l'Europe (UE-28) a vu sa surface forestière augmenter de 0,35%/an (FAO, 2015). Parmi ses 28 pays, la France a connu l'augmentation la plus forte (+110 000 ha/an ; Forest Europe, 2015) sur la dernière décennie (2005-2015).

Les phénomènes de transition et d'expansion forestière sont définis, généralement, à l'échelle nationale. Néanmoins, des hétérogénéités spatiales sont observables. Aux Etats-Unis, un gradient Est-Ouest de transition forestière a été constaté (Kauppi *et al.*, 2006), En Espagne, une hétérogénéité spatiale de l'expansion a également été démontrée dans la partie Nord-Est du pays (Marey-Pérez *et al.*, 2006). En France, entre 1980 et 1991, l'expansion des forêts françaises était principalement concentrée sur le pourtour méditerranéen et dans le Massif Central (Pignard, 2000). Ces hétérogénéités se retrouvent aussi au niveau de différents facteurs comme le type de propriété, la composition en essence et la structure forestière. Sur la même période, l'expansion a été plus forte dans les forêts feuillues (+355 000 ha en 11 ans ; Pignard, 2000) que dans les forêts résineuses (+258 000 ha) mais le rythme de progression des résineux était plus intense (+5,4% contre +4,2% pour les feuillus). Les hétérogénéités au niveau de la géographie et du type de propriété reflètent, entre autre, des déterminants de l'utilisation du sol. Celles au niveau de la composition forestière font échos, par exemple, aux grandes politiques de boisement (comme le Fonds Forestier National ; FFN). Mieux connaître ces hétérogénéités est donc primordial pour la compréhension de la dynamique forestière.

1.2 La transition forestière en France

La France a l'avantage d'être riche en données forestières anciennes. Cependant, ces données ne sont pas continues dans le temps et diffèrent quant à la définition de la forêt, centrale dans cette perspective. Leur utilisation est donc délicate. Les données sont très sporadiques avant la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle et ne permettent qu'une reconstitution de la tendance générale (Mather *et al.*, 1999).

Plusieurs reconstitutions de l'évolution des surfaces forestières françaises ont été effectuées (Mather *et al.*, 1999 ; Cinotti, 1996) et permettent de retracer l'histoire de cette dynamique.

D'après Thirgood (1989), à l'époque romaine, les deux tiers du territoire français étaient recouverts de forêts et d'après Bourgenot (1977), cette proportion était de 60% au IX^{ème} siècle. Ensuite, la surface forestière aurait diminué jusqu'en 1350 allant de pair avec l'augmentation de la population, des défrichements et des surfaces agricoles (Mather *et al.*, 1999). Vers 1350, la peste noire a diminué dramatiquement la population française, conduisant à un abandon des terres et une augmentation de la surface forestière jusqu'aux alentours de 1450. La ré-augmentation de la population qui a suivi s'est accompagnée d'une nouvelle diminution de la surface forestière jusqu'au début du XIX^{ème} siècle. Entre le XVI^{ème} et le XVIII^{ème} siècle, de nouveaux besoins industriels (forges, verreries, salines) et le besoin de bois de construction pour la marine ont engendré une forte pression sur la forêt. Face à la déplétion de la ressource forestière, l'Ordonnance de Louis XIV est élaborée en 1669 afin de réorganiser son exploitation mais la surface forestière continue à diminuer. C'est au XIX^{ème} siècle que la transition énergétique, l'exode rural, l'intensification de l'agriculture et le changement de perception vis-à-vis de la forêt ont entraîné une nouvelle augmentation de la surface forestière. Le code forestier de 1827, inspiré de l'ordonnance de 1669, a accompagné cette transition en restreignant les usages de la forêt, puis en favorisant un progrès technique forestier permettant une gestion plus productive des forêts (sylviculture).

La forêt française a donc connu deux oscillations de surface forestière : une autour de 1350 et l'autre au début du XIX^{ème} siècle. Alors que la première est due à un facteur externe et n'a donc été qu'une variation temporaire, la deuxième traduit un véritable changement de mode de vie et de pensée et semble devoir être plus durable. On ne retiendra donc que cette deuxième évolution comme véritable transition forestière française. Depuis cette date, la surface forestière est en nette progression. Cinotti (1996) montre une accélération de l'expansion autour de 1970 et une forte perte de vitesse d'expansion depuis 1980 résultant en une quasi-stagnation des surfaces forestières, qui n'est pas sans interroger (**Figure 1.2**).

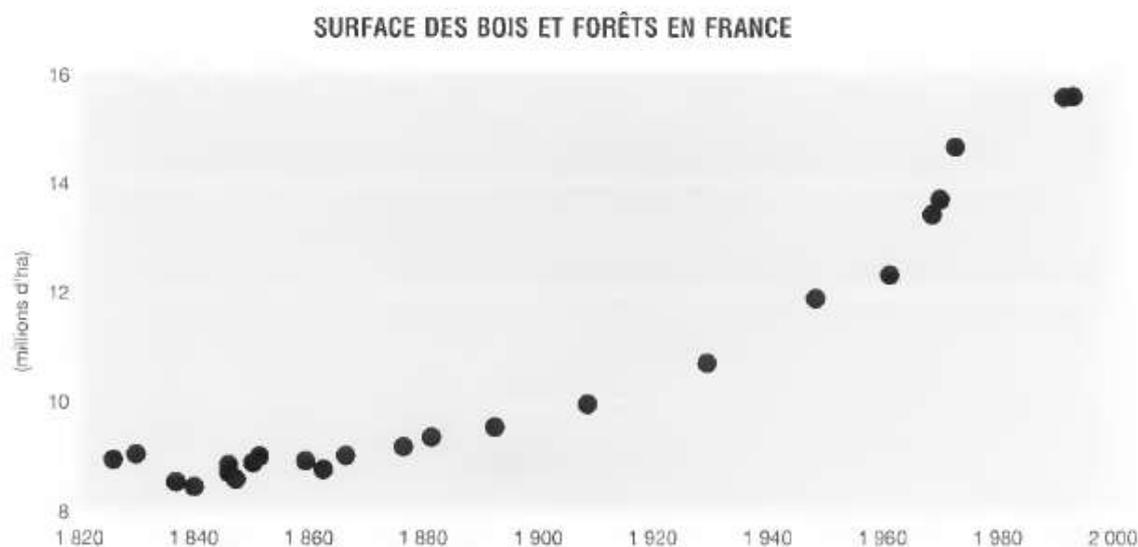


Figure 1.2. Evolution de la surface forestière française entre 1820 et 2000 (Source : Cinotti, 1996)

Des programmes de reboisements ont marqué cette période d'augmentation, ceux liés au boisement des landes de Gascogne (à partir de 1801 ; Bazire et Gadant, 1991), à la Restauration des Terrains de Montagne (depuis 1860 ; RTM ; Parde, 1998) et les boisements du Fonds Forestier National (1947-1999 ; FFN ; Dodane, 2009). D'après Pignard (2000), seulement 15% de l'expansion totale de la surface des forêts françaises entre 1980 et 1991 pourrait cependant être attribuée aux boisements artificiels.

1.3 Les facteurs de changements de surface forestière en France depuis le début du XX^{ème} siècle

Les raisons des variations de surface sont multiples et complexes. Elles peuvent être, par exemple, sociales ou économiques. Chacune de ces causes « distales » va avoir un impact sur la surface via des boisements (spontanés ou non) ou des déboisements. Ces derniers sont alors identifiés comme des causes dites « proximales ». Nous avons listé les causes proximales (politiques de boisement, déforestations, *etc.*) et l'impact qu'elles ont eu sur la surface forestière.

Une distinction est à faire entre boisement et reboisement. Le premier correspond à une extension forestière et est associé à un changement d'utilisation du sol qui passe d'une utilisation non forestière à de la forêt. Le deuxième ne fait pas intervenir de changement d'utilisation et correspond à une replantation ou un enrichissement de forêt appauvrie sur un sol déjà boisé précédemment. Ainsi, si le FFN a contribué pour plus de 2 Mha de boisement et

reboisements, on estime sa contribution nette à la surface à 0,8 Mha (Dodane, 2009). Dans l'étude de l'expansion des surfaces, c'est bien les boisements qui nous intéressent.

1.3.1 Le boisement des landes de Gascogne (XIX^{ème} siècle)

Les landes de Gascogne, à la fin du XVIII^{ème} siècle était décrites comme « un paysage désolé de marais insalubres » (Bazire et Gadant, 1991). En 1801, la stabilisation des dunes par la plantation de pins maritimes (méthode de Brémontier) a été engagée. Ces plantations seront poursuivies pendant 50 ans. Par la suite, à partir de la mise en place de la loi du 19 juin 1857, l'intérieur du pays va être assaini grâce, également, à la plantation de pins maritimes. En un demi-siècle, la surface du massif forestier des landes va augmenter de 713 000 ha (Bouisset et Pottier, 2009). Depuis, la surface de ces forêts n'a pas fortement varié et on compte 707 000 ha de pins maritimes dans les départements de la Gironde, des Landes et du Lot-et-Garonne.

1.3.2 La Restauration des Terrains de Montagne (1860 – nos jours)

Au début du XIX^{ème} siècle, la population montagnarde est à son maximum et génère une forte pression sur la forêt à cause du pâturage et des défrichements (Gasdon, 2013 ; Ogé, 1988 ; Mather, 1992). Mather *et al.* (1999) parlent d'une perte de 71% de la surface forestière dans les Alpes-de-Haute-Provence entre 1791 et 1840 et de 41% dans le Var. Face aux crues violentes et l'érosion des sols causant de forts dégâts, Dugied en 1819 puis Surell en 1841 alertent sur les dangers de cette déforestation. C'est en 1860 que sera mise en place une première loi sur les reboisements. Cette loi impose le reboisement obligatoire par l'Etat de tous les terrains dont l'état du sol engendre des dangers pour les terrains inférieurs (Combes, 1989). Elle vise le reboisement de 1,1 million d'hectares (Larrère *et al.*, 1980). La loi va connaître des modifications dans le temps (notamment la loi de 1882 ; Parde, 1998) pour ne se focaliser par la suite que sur les zones où il a des « dangers nés et actuels » (de Crécy, 1988), avec une forte restriction de l'ambition initiale. Seule la gestion des forêts des dix départements appartenant à la catégorie « où l'érosion et l'activité torrentielle demeurent » (Haute-Savoie, Savoie, Isère, Hautes-Alpes, Alpes-de-Haute-Provence, Alpes Maritimes, Hautes-Pyrénées, Haute-Garonne, Ariège, et Pyrénées-Orientales) est alors confiée aux services spéciaux de Restauration des Terrains de Montagne (RTM ; Messines, 1970 dans Garet, 2015). En 1897, déjà 78 500 ha, et 228 000 ha en 1998 avaient été reboisés et boisés (Parde, 1998). Au final, ce sont 257 000 ha qui sont comptabilisés comme reboisés ou boisés dans les forêts domaniales (Garet, 2015). Les essences principales sont le Pin noir d'Autriche, qui n'est pas une essence naturellement présente sur le territoire et le Mélèze, également introduit, et implanté surtout dans les hautes vallées (Douguedroit, 1980 ; SAILLET, 1991), et qui représentent aujourd'hui 198 000 ha et 117 000 ha de forêts respectivement.

1.3.3 Reboisements après-guerre (1918)

Les combats de la première guerre mondiale ont ravagé les terres dans une zone importante du Nord-Est de la France. Une zone de 120 000 ha correspondant à un ensemble de terres « pour lesquelles on juge inadmissibles soit les frais soit les délais de remise en état de productivité comparable à l'état d'avant-guerre » est alors délimitée. Une politique d'expropriation des terres de la zone rouge est alors mise en place (Amat, 1999). Au total, 17 093 ha (dont 15 000 ha en Meuse et 1 300 en Meurthe-et-Moselle ; Amat 1987) sont passés dans le domaine privé de l'Etat dans l'optique d'être reboisés ou boisés (Amat, 1999). En Champagne, les terres ont été utilisées pour l'aménagement de camps militaires et aucun boisement ou presque n'a été effectué (communication personnelle, Jean-Paul, 27/09/2016). Dans le Nord, région à tradition agricole, les terres ont été rendues aux propriétaires pour être de nouveau cultivées (communication personnelle, Jean-Paul, 27/09/2016). En dépit du traumatisme associé à des dépréciations issues de conflits, l'atteinte aux forêts, ainsi que l'effort de reconstitution, reste cependant anecdotique au vu de l'ampleur quantitative de la transition forestière à l'œuvre, et des programmes de boisements précédents.

1.3.4 Le Fonds Forestier National (1946-1999)

Parmi les politiques de boisement du XX^{ème} siècle, celle du Fonds Forestier National (FFN) a eu le plus fort impact sur la surface forestière française. Cette politique a été mise en place après la seconde guerre mondiale afin de reconstituer les ressources forestières françaises (Delong, 1987). Le projet prévoyait le boisement et reboisement de 3 à 4 millions d'hectares (Gadant, 1987) à la cadence de 70 à 100 000 ha/an (Fesquet, 1997) et les zones privilégiées étaient la Bretagne, le Massif Central, la Bourgogne, les Landes et les Pyrénées (Betolaud, 1972 ; **Figure 1.3**). Les boisements et reboisements ont commencé à une vitesse soutenue de 60 000 ha/an avant 1969 (Bazire, 1969). Après 10 ans, 1 million d'hectares avaient déjà été plantés (Dufay, 1972). Cependant, le rythme a ralenti par la suite (**Figure 1.4**) et, au total 2,3 millions d'hectares ont été boisés et reboisés, les boisements nets étant estimés à 800 000 ha (Dodane, 2009).

Les essences subventionnées par cette politique ont essentiellement été des résineux : Douglas, Epicéa commun, Sapin pectiné et pins (majoritairement le Pin maritime ; Cottin, 1995 ; Pourtet, 1972). L'objectif initial d'abord quantitatif a ciblé les plantations résineuses et s'est ensuite plus qualitativement orienté vers l'amélioration des peuplements ainsi que la diversification des essences (Génére, 2006).

En l'an 2000, la loi de finance a supprimé les deux taxes constituant l'essentiel des ressources du FFN, marquant la fin de cette politique (Barthod, 2001).

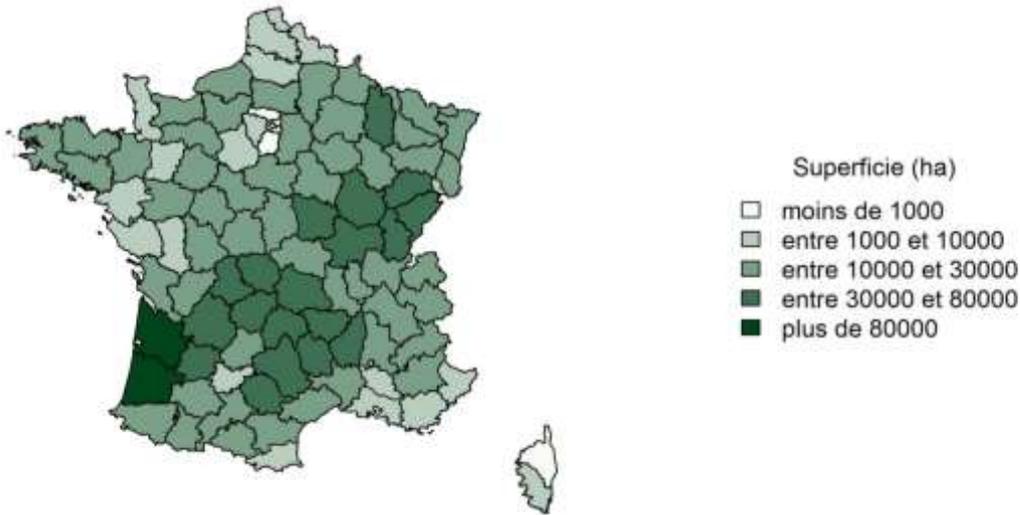


Figure 1.3. Localisation de l’effort de boisement et reboisement du FFN (Source : de Galbert *et al.*, 2015)

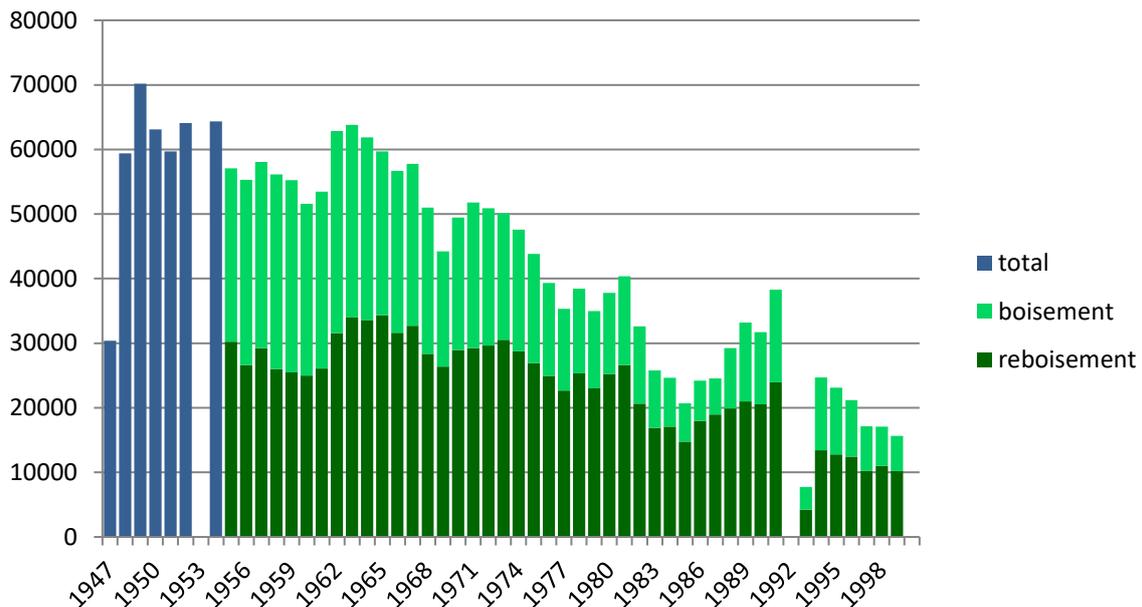


Figure 1.4. Superficie des boisements et reboisements réalisés grâce aux aides du FFN. Source : Bilans annuels du Fonds Forestier National (Source : Durin, 2012)

1.3.5 Reboisements non FFN (1946-1999)

Pendant la période du FFN, tous les boisements effectués n’ont pas été subventionnés par cette politique. Il est considéré que les boisements subventionnés par d’autres sources sont au moins égaux à la moitié de ceux effectués par le FFN (Giraut, 1972 ; Dodane, 2009). De la

sorte, c'est donc près de 0,4 Mha qui a été gagné sur des terres agricoles dans cet effort de boisement survenu après le second conflit mondial.

1.3.6 Déboisements en champagne (1950)

Au début du XX^{ème} siècle, la Champagne crayeuse était une région pauvre et dépeuplée car son sol ne semblait pas permettre l'agriculture. Après avoir été plantée au XIX^{ème} siècle (70 000 ha, principalement de pin sylvestre, dans la Marne entre 1750 et 1939 ; Leroux, 1961), vers 1950, la mécanisation et surtout les engrais ont permis de mettre en place de grandes parcelles de betterave, de luzerne et de céréales dans cette région. Cette progression de l'agriculture a été accompagnée par une forte diminution de la surface forestière, dont celles précédemment plantées. La Marne passe alors d'un taux de boisement de 26,2% à 9% (**Tableau 1.1** ; Chevalier, 1972). La diminution totale (calculée à partir des surfaces des départements fournies par l'IGN) est de 270 000 ha.

Département	Surface forestière (ha)	
	Taux de boisement (hors terrains militaires ; en %)	
	1950	1969
Ardennes	93 000	45 000
	17,6	8,5
Marne	215 000	74 000
	26,2	9,0
Aube	171 000	93 000
	28,4	15,4

Tableau 1.1. Taux de boisement en Champagne crayeuse. Comparaison 1950-1969 (Chevalier, 1972)

1.3.7 Boisements spontanés

Bien que ce soit un phénomène observé dans toute l'Europe (Naizot, 2005), il est très difficile de chiffrer les boisements spontanés correspondant à des boisements qui s'effectuent sans intervention de l'homme. On trouve dans ces boisements les boisements passifs qui se font sur des sols anciennement agricoles suite à leur abandon physique (Lepart *et al.*, 2011 ; Boulley, 1964 ; Jaudon *et al.*, 2009), et les boisements spontanés qui se font sur des sols qui n'étaient ni agricoles ni forestiers avant suite, par exemple, à l'élévation de la limite des arbres en montagne (Grace *et al.*, 2002). Les boisements passifs sont principalement dus à la révolution industrielle et l'intensification de l'agriculture (Mather *et al.*, 1999). Entre 1960 et 2007, la Surface Agricole Utile (SAU) a fortement diminué en France avec une perte de 5,1 millions d'hectares (Pointereau et Coulon, 2009) dont 1,2 millions entre 1992 et 2003 (Chakir et Madignier, 2006). Entre 1988 et 2010, quasiment tous les départements présentent

une diminution de leur SAU sauf l'Alsace, la Lorraine et les Alpes (**Figure 1.5** ; Cavailhès et Normandin, 1993).

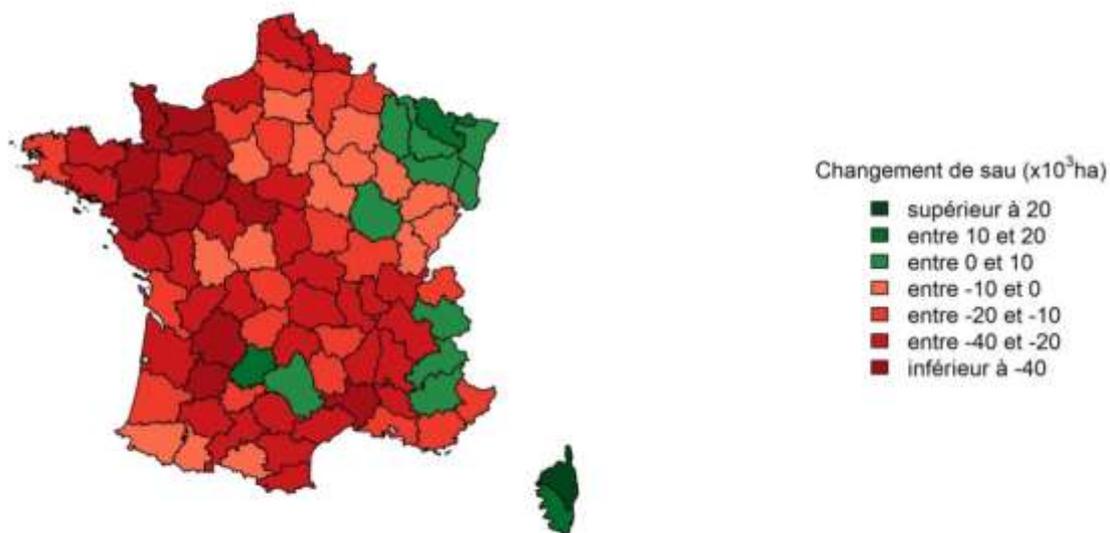


Figure 1.5. Différence de SAU entre 1988 et 2010 en ha (chiffres Agreste¹)

Certains cas particuliers sont présentés par Koerner *et al.* (2000) comme le cas du Périgord où le Phylloxéra a détruit une grande partie des vignes conduisant à l'abandon de nombreuses vignes. La surface forestière est alors passée dans cette zone de 250 000 ha en 1908 à 310 000 ha en 1948.

¹ Recensements agricoles de 1988, 2000 et 2010, Ministère de l'agriculture et de l'agroalimentaire, http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/xls/Donnees_principales__canton_departement_.xls

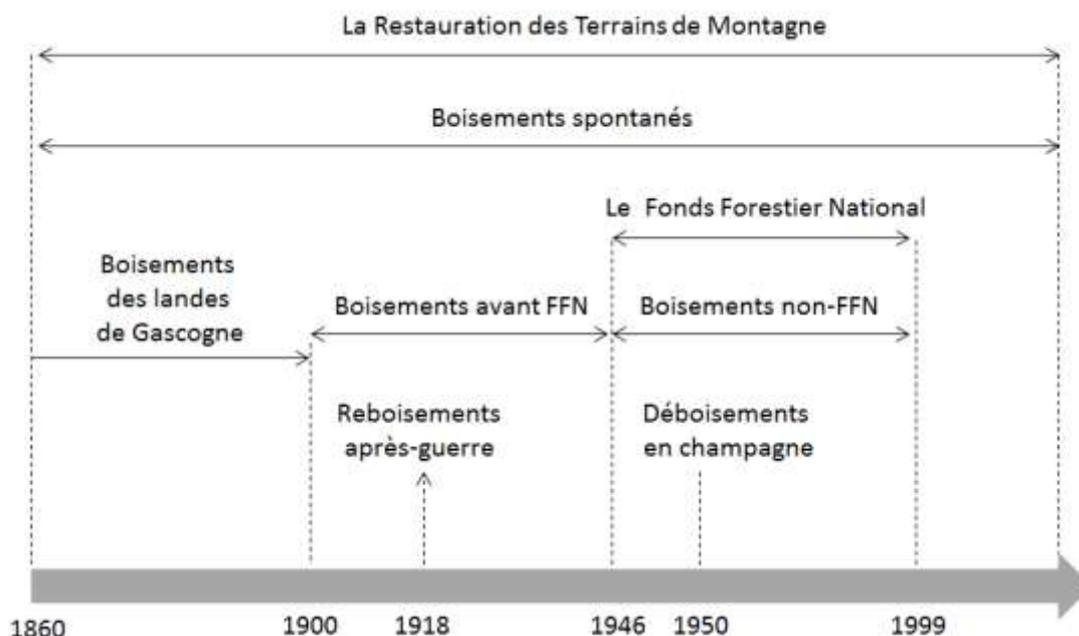


Figure 1.6. Chronologie des différents facteurs de changements de surface forestière en France depuis 1860

Même avec une forte incertitude, il est possible, à partir des estimations précédemment relevées, d'établir un bilan quantitatif des boisements spontanés. En comparant les données de la statistique Daubrée à celles de l'IFN (moyenne des surfaces entre 2008 et 2014), on en déduit que la France a gagné 5,4 millions d'hectares entre 1908 et 2011. Si l'on considère que les boisements entre 1908 et 1946 (*i.e.* les boisements effectués avant le début du FFN ; **Figure 1.6**) n'ont pas dépassé les boisements non FFN effectués entre 1946 et 1999 sur la période du FFN (*i.e.* 0,4 millions d'hectares), on a entre 1908 et 2011 :

Boisements spontanés
+ FFN
+ RTM
+ Boisements post première guerre-mondiale
+ Boisements non FFN (1946-1999)
+ Boisements avant FFN (1908-1946)
- Déboisements Champagne
<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/>
Augmentation totale de surface

De cette équation, il est possible de déduire les boisements spontanés :

Augmentation de surface	5,4 millions d'hectares
- FFN	- 0,8 million d'hectares
- RTM	- 0,25 million d'hectares
- Boisements post première guerre-mondiale	- 0,017 million d'hectares
- Boisements non FFN (1946-1999)	- 0,4 million d'hectares
- Boisements avant FFN (1908-1946)	- 0,4 million d'hectares
+ Déboisements Champagne	+ 0,27 million d'hectares
<hr/>	<hr/>
Boisements spontanés	3,8 millions d'hectares

La totalité des boisements RTM ont été pris en compte bien que ceux-ci aient commencé en 1860 et représentent donc, en partie, des boisements effectués avant notre période d'étude. D'après ce bilan, les boisements spontanés sont la principale cause de l'augmentation des surfaces forestières françaises depuis le début du XX^{ème} siècle (**Figure 1.7**).

La totalité des boisements RTM ont été pris en compte bien que ceux-ci aient commencé en 1860 et représentent donc, en partie, des boisements effectués avant notre période d'étude. D'après ce bilan, **les boisements spontanés sont donc la principale cause de l'augmentation des surfaces forestières françaises depuis le début du XX^{ème} siècle (Figure 1.7), avec l'ordre de grandeur considérable de près de 3,8 millions d'ha.**

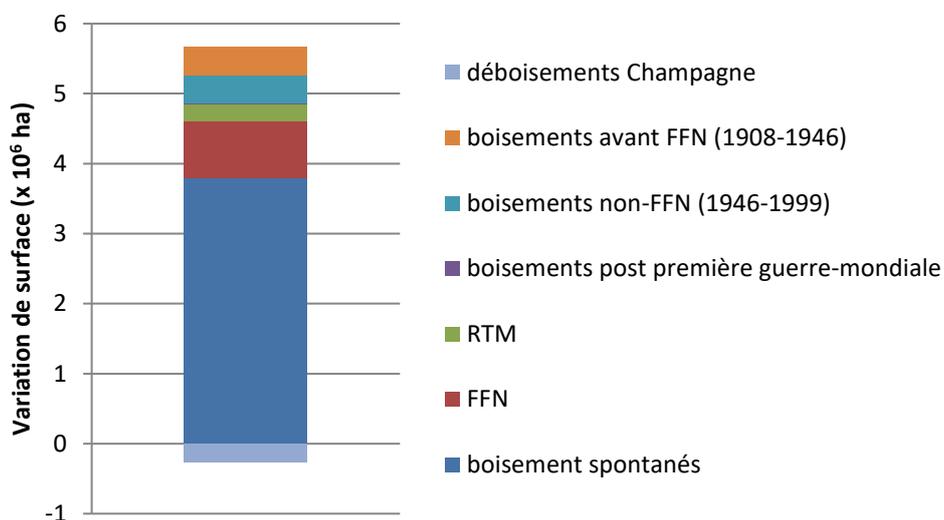


Figure 1.7. Ventilation des changements de surface de la forêt française entre 1908 et 2011 en fonction des facteurs de ces changements.

Pour la période récente (2006-2014), les zones présentant le plus fort passage de sol agricole à sol boisé sont le Rhône-Alpes (29 000 ha), l'Aquitaine (29 000 ha) et la Basse-Normandie (27 000 ha ; **Figure 1.8**).

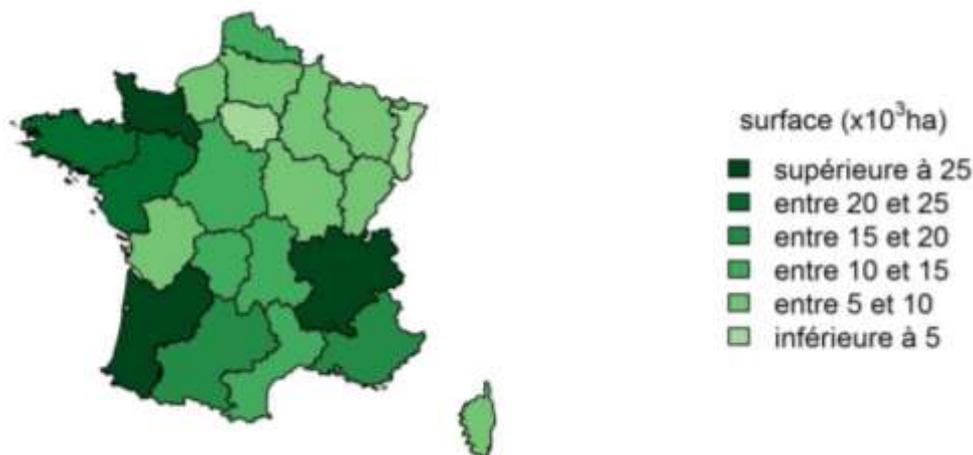


Figure 1.8. Carte de la surface de terres agricoles devenues forestières entre 2006 et 2014, ventilée par régions administratives (données Agreste, Teruti-Lucas²)

La corrélation entre le taux de boisement et la progression de la surface forestière sur les 28 pays européens est de -0,40 ($p=0,03$; **Figure 1.9**). **La vocation agricole historique de la France (50% de la surface du pays est agricole) et la faible proportion de surfaces boisées (31% ; Figure 1.10) comparée aux autres pays européens, expliquent en partie la forte intensité de l'expansion observée dans le pays.**

² Résultats régionaux de l'enquête Teruti-Lucas, <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/teruti2015T4bsva.pdf>

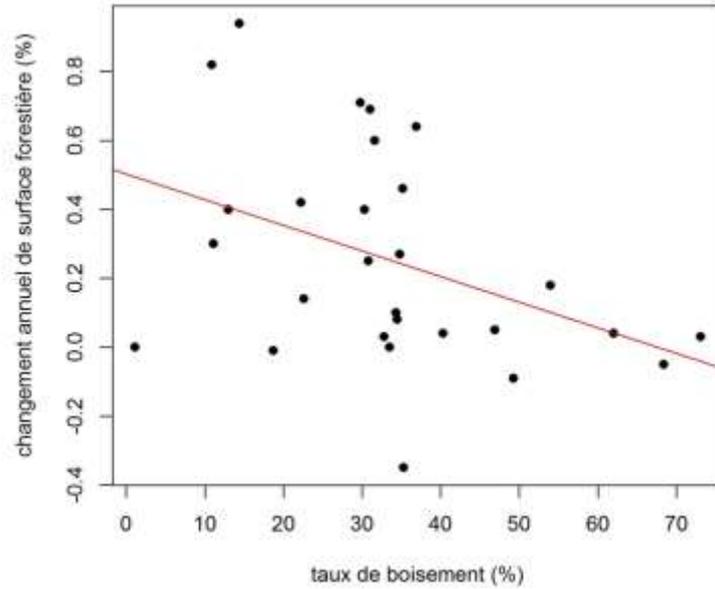


Figure 1.9. Corrélation entre le changement annuel de surface forestière relatif et le taux de boisement pour les pays européens (UE-28) entre 2005 et 2015 (Forest Europe, 2015)

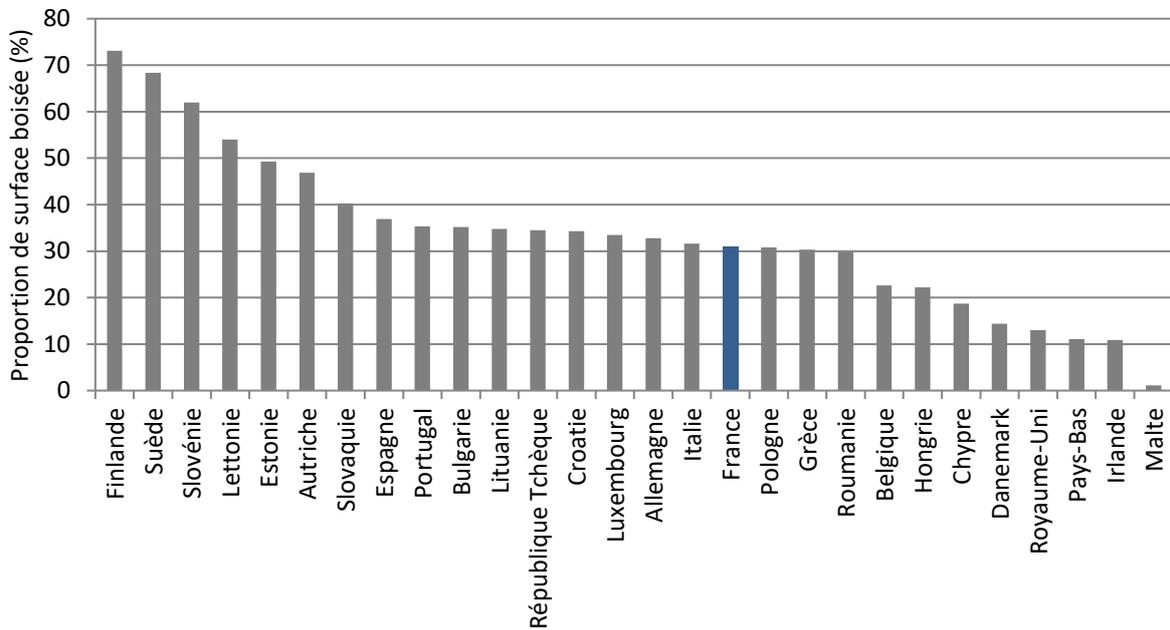


Figure 1.10. Proportions des surfaces boisées des pays de l'Union Européenne (UE-28) en 2015 (d'après les données de Forest Europe, 2015)

2 L'évolution du stock de bois sur pied, un fait négligé de la théorie de la transition forestière

La transition forestière a été initialement présentée et étudiée par des géographes (comme Mather) et donc perçue seulement comme un changement de surface. La problématique mise en avant est celle de l'utilisation du sol, ses changements et leurs causes. Mather *et al.* (1999), par exemple, proposent des causes pour ces changements de surface en France (déprise agricole, industrialisation, RTM, *etc.*). Un des buts est d'étudier dans quelle mesure le phénomène de déforestation observé dans les pays en développement pourrait être analogue à celui précédemment observé dans les pays développés, actuellement dans une dynamique de reforestation.

En plus de la surface forestière, les inventaires nationaux renseignent sur le volume de bois. Le stock sur pied ou volume correspond au volume de bois vivant dans une forêt. Cette définition peut changer d'un pays à l'autre (Vidal *et al.*, 2008) mais, dans le cas de l'inventaire forestier français, cela correspond au volume de la tige principale jusqu'à une découpe de 7 cm (IFN, 2011b).

En 2006, Kauppi *et al.* ont introduit la notion d'« identité forestière », définie par 4 variables d'état (surfaces, densité du stock en volume, biomasse et carbone), mettant en avant l'importance de l'étude du stock de bois sur pied dans la compréhension et la prédiction de la dynamique des forêts. Du point de vue du forestier, étudier quels ont été les changements de volume de bois en France ainsi que leur(s) cause(s) apparaît nécessaire puisque ce dernier correspond véritablement aux ressources forestières.

2.1 Une expansion plus rapide qu'en surface

L'Europe (EU-28) est le seul continent à connaître à la fois une augmentation de sa surface forestière (+0,35%/an entre 1990 et 2015) et de son stock sur pied (+1,33 %/an ; FAO, 2015). Pourtant, c'est aussi le continent où les prélèvements de bois sont les plus forts (1,7% de bois prélevés chaque année), montrant à quel point l'expansion en stock est intense.

Parmi les pays d'Europe, la France a connu l'augmentation la plus forte entre 1990 et 2015 en surface (+110 000 ha/an, ex-aequo avec l'Espagne ; Forest Europe, 2015) et en stock sur pied (+ 35 millions de m³/an). De plus, un doublement du stock de bois sur pied en 50 ans a été suggéré (Hervé *et al.*, 2014). L'évolution du stock est beaucoup plus rapide que celle des surfaces (+0,65%/an entre 1990 et 2015 pour les surfaces contre +1,3%/an pour le volume ; FAO, 2015) entraînant une densification du stock de bois en forêt (Pignard, 2000). Alors que la France occupe la troisième place européenne en termes de stock sur pied (2600 millions de m³) après l'Allemagne et la Suède (respectivement 3700 et 3000 millions de m³ ; Forest Europe, 2015), son expansion est plus rapide (+1,1%/an pour

l'Allemagne et +0,7%/an pour la Suède). A ce rythme, la forêt française pourrait devenir le second stock sur pied européen en une décennie. Cette évolution très rapide montre d'autant plus la nécessité de compréhension de ce phénomène.

Nabuurs *et al.* (2013) ont suggéré que les premiers signes de saturation du puits de carbone des forêts européenne sont déjà apparus, spécialement dans les forêts de l'Ouest de l'Europe. Cependant, les changements de stock sur pied entre 1990 et 2015 observés en Europe ne sont pas corrélés à la densité de stock sur pied en 1990 (**Figure 1.11**), ce qui semble contredire cette observation d'une saturation dans le futur proche. Cela montre aussi que le stock augmente dans des pays dont la densité de stock est nettement supérieure à celle des forêts françaises. Ainsi, la densification des forêts française devrait pouvoir continuer encore longtemps et constituer un puit de carbone important.

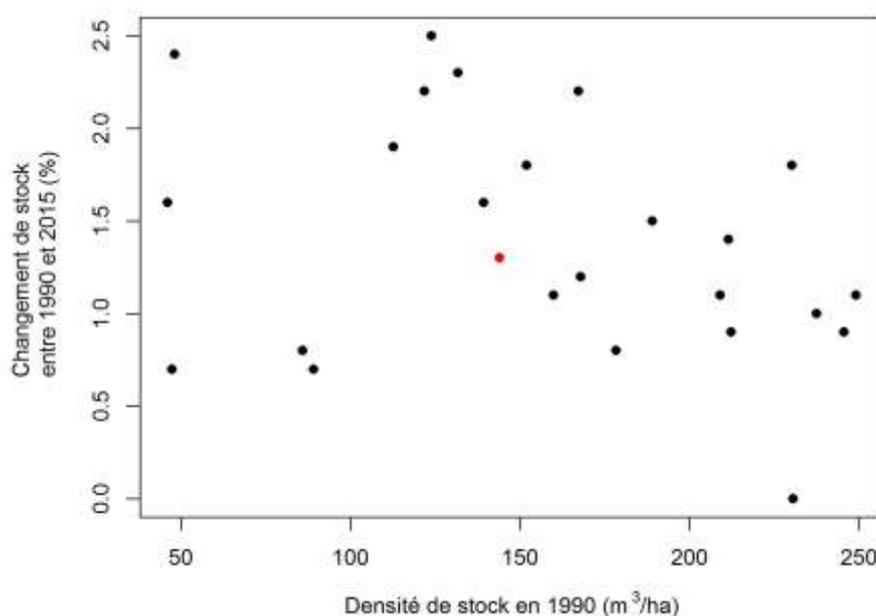


Figure 1.11. Variation relative du stock de bois sur pied des forêts des pays membres de l'Union Européenne (UE-28) entre 1990 et 2015 en fonction de leur densité de stock en 1990 (données de Forest Europe, 2015). En rouge : la France.

2.2 Des enjeux politiques, écologiques et économiques

La caractérisation et la compréhension de l'expansion en stock sur pied sont liées à des enjeux majeurs, à la fois politiques, environnementaux et économiques.

Tout d'abord, l'augmentation du stock sur pied contribue à une augmentation de la séquestration du carbone (Houghton *et al.*, 1999 ; Rhemtulla *et al.*, 2009 ; Li *et al.*, 2016 ; Naudts *et al.*, 2016 ; Wilkenskjeld *et al.*, 2014). En 1990, la forêt française présentait le second stock de carbone d'arbre de l'Europe (EU-27) avec 734 Tg C (Karjalainen *et al.*,

2003), après la Suède (904 Tg C) et juste devant l'Allemagne (712 Tg C). L'expansion du stock sur pied constitue donc un enjeu à la fois environnemental et politique dans le cadre des politiques d'atténuation du changement climatique.

Comprendre l'expansion et ses mécanismes est aussi de première importance pour permettre une utilisation accrue des ressources en bois dans la perspective de montée en puissance de la bio-économie au niveau européen (European commission, 2015). Les forêts peuvent apporter une source d'énergie de substitution aux énergies fossiles ainsi que des matériaux capables de contribuer à l'atténuation du changement climatique, mais cette utilisation du bois doit se faire à travers une gestion durable des forêts, et pose la question du maintien du puits de carbone (Searchinger *et al.*, 2018 ; McKechnie *et al.*, 2010). De plus, en 2014, la valeur du bois récolté (commercialisé et autoconsommé) en France était de 2,889 milliard d'euros (Maaf et IGN, 2016) et le secteur forestier contribuait en 2000 à 0,7% du PIB national (Lebedys, 2004). Ainsi, la forêt a une place importante dans l'économie qui, par le biais de l'augmentation du stock sur pied, pourrait fortement augmenter. Pour aider les décideurs, les caractéristiques de l'expansion en stock doivent être analysées, comme la localisation des forêts en expansion, les essences concernées et la disponibilité du bois.

Mieux comprendre l'expansion des forêts françaises à la fois en surface et en stock est donc indispensable pour la mise en place de politiques forestières cohérentes et durables. D'un point de vue scientifique, l'étude de l'augmentation du stock des forêts est capitale. En effet, très peu de d'études sont disponibles sur cette évolution sur le long terme. Plusieurs questions capitales comme le lien entre l'expansion en surface et l'augmentation du stock, les mécanismes mis en jeu, le rôle de la densification des forêts dans cette augmentation n'ont pas encore été abordées et comprendre cette augmentation sur le long terme permettrait de pouvoir projeter son évolution sur des périodes longues.

2.3 Les facteurs de changements de stock depuis le début du XX^{ème} siècle

Les changements de stock sur pied résultent de l'équilibre entre croissance des arbres, recrutement de nouveaux arbres (sur une surface déjà forestière ou non), mortalité et prélèvement de bois. Ils sont donc à la fois dus aux changements de surface forestière mais aussi à des changements au niveau de la densité du couvert (densification ou éclaircie). Pignard (2000) a montré que les forêts françaises connaissaient une véritable densification. L'étude de ces changements est donc primordiale pour comprendre l'expansion du stock sur pied. La séparation de la contribution de chacun de ces facteurs dans l'expansion totale en stock est difficile.

L'expansion en surface des forêts françaises, par l'apport de nouveaux arbres (par plantation et boisements spontanés), entraîne une augmentation du stock sur pied. L'augmentation spontanée des forêts, premier facteur d'expansion en surface (**Figure 1.6**), se fait de façon éparse avec une première phase présentant des forêts très peu denses (Lepart *et al.*, 2011) avec

un stock s'installant lentement. Alors que les facteurs de changement de surface ont déjà été présentés, nous avons listé dans la suite les facteurs de changement de densité du couvert depuis le début du XX^{ème} siècle.

2.3.1 Augmentation de la productivité biologique

Depuis le début du XX^{ème} siècle, il est observé en Europe une augmentation de la productivité biologique des forêts. Une analyse sur le continent européen (12 pays étudiés) a mis en évidence une augmentation des rythmes de croissance (Spiecker *et al.*, 1996). Dhôte et Hervé (2000) relèvent une augmentation de +25 à +50% de la croissance en surface terrière depuis 1930 dans les chênaies de France. Bontemps *et al.* (2012) annonce une augmentation de croissance en hauteur de +50% à +100% en 100 ans pour le chêne sessile et le hêtre. Enfin, Pignard (2000) présente une augmentation de +14,9% de croissance radiale entre 1980 et 1991 sur la France entière. La croissance augmentant, les forêts capitalisent donc d'avantage si les prélèvements restent constants.

Des études ont montré l'effet de changements anthropiques sur la croissance des forêts (Kahle *et al.*, 2008; Bontemps *et al.*, 2011) ainsi que l'effet du changement climatique (Boisvenue et Running, 2006; Charru *et al.*, 2017), expliquant les augmentations observées.

De plus, les nouvelles forêts pourraient avoir une production plus forte que les anciennes. Cela peut être dû :

- à l'installation de nouvelles forêts sur d'anciennes terres agricoles qui ont connu une modification chimique de leur sol, ce qui entraîne une plus forte productivité de ces forêts (Koerner *et al.*, 1999) ;
- à l'installation, par plantation, d'essences résineuses à croissance rapide (Douguedroit, 1980 ; Pourtet, 1972), avec le double bénéfice d'une installation plus rapide et d'un accroissement marqué.

2.3.2 Des prélèvements en deçà de la production biologique

Avant 2005, l'IFN relevait les prélèvements en comptabilisant les souches d'arbres prélevés dans les 5 dernières années. L'âge des souches étant difficile à estimer, ces prélèvements sont peu fiables. Depuis 2005, un retour sur point 5 années après a été mis en place et permet d'avoir une estimation exacte des prélèvements effectués. Pour étudier l'évolution des prélèvements sur le long terme, il semble donc indispensable d'utiliser une autre source de données.

Les prélèvements montrent une augmentation depuis 1947 et principalement chez les conifères (**Figures 1.12 et 1.13**). Sur la période récente, on remarque cependant une diminution générale des prélèvements en feuillus. Entre 1970 et 1979, on comptabilisait 8,4 millions de m³ de bois d'œuvre feuillus récoltés par an alors qu'entre 2010 et 2013 on en comptabilisait seulement 5,1. Au contraire, les prélèvements résineux sont en quasi-constante

augmentation, passant de 10,7 millions de m³/an entre 1970 et 1979 à 14,6 entre 2010 et 2013 (Forêt Privée Française d'après les données de l'EAB³).

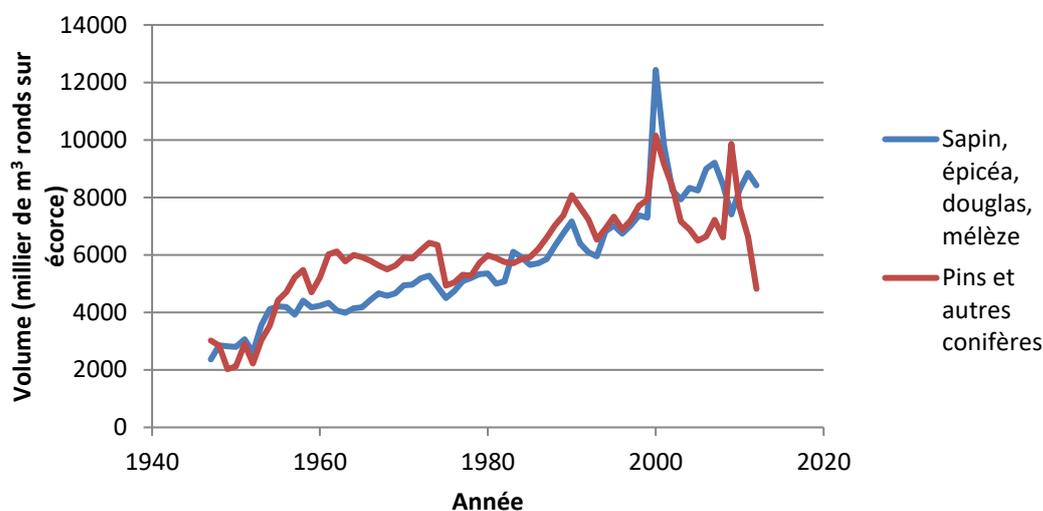


Figure 1.12. Récolte de bois d'œuvre résineux de 1947 à 2007 (Données Agreste⁴).

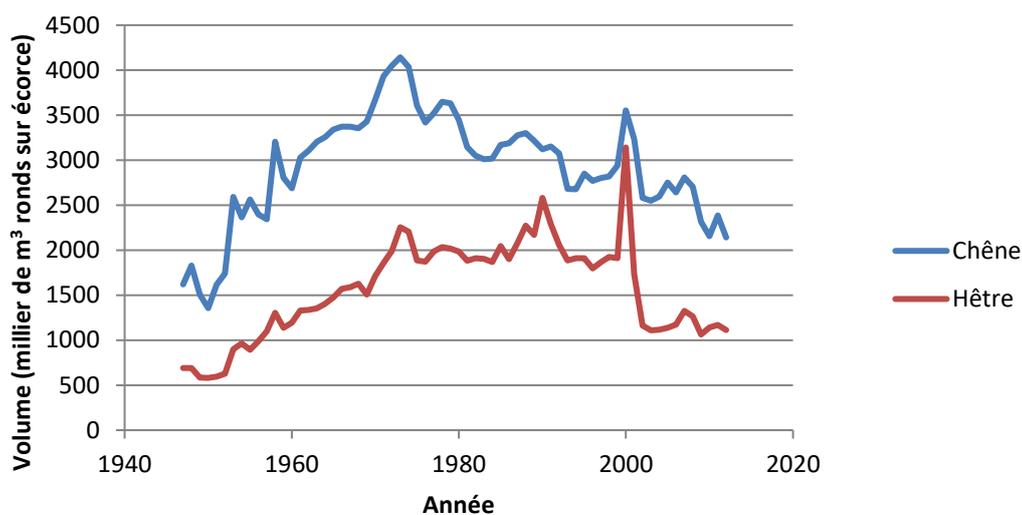


Figure 1.13. Récolte de bois d'œuvre de chêne et de hêtre de 1947 à 2007 (Données Agreste⁵).

³ <https://www.foretpriveefrancaise.com/n/reperes-sur-la-production-de-bois/n:2177>

⁴ Résultats nationaux de l'enquête de Branche
<https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/faces/report/tableauList.jsp>

⁵ Résultats nationaux de l'enquête de Branche
<https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/faces/report/tableauList.jsp>

L'IFN comptabilise un taux de prélèvement net (*i.e.* prélèvements/(production-mortalité)) global de seulement 49% (IFN, 2011c). Les prélèvements observés sont fortement inférieurs à la croissance. Ballu (2009) énonce des causes possibles du niveau de ce ratio modéré :

- les causes techniques liées à la faible exploitabilité de 30% des surfaces forestières,
- les causes sociologiques liées au morcellement des forêts privées et le refus d'exploiter pour plus de « tranquillité »,
- les causes administratives et juridiques liées aux réglementations qui limitent la surexploitation des forêts françaises
- les causes économiques et industrielles liées directement aux règles de l'offre et de la demande.

De plus, ce ratio peut aussi être dû à un jeune âge des peuplements français, entraînant une forte croissance mais de faibles prélèvements.

Le niveau de prélèvements observé entraîne naturellement une capitalisation du stock sur pied.

Les prélèvements ne sont pas répartis de façon homogène sur le territoire. Le Sud-Est, la Bretagne et les Pyrénées sont trois zones où l'Inventaire Forestier a relevé très peu de marques de prélèvement entre 2005 et 2010 (**Figure 1.14**). Sur la période récente, les plus forts prélèvements s'observent surtout dans le Sud-Ouest et principalement dans les Landes et en Alsace-Lorraine (**Figure 1.15**).

Etudier le lien entre prélèvements et différents facteurs comme la géographie et la maturité des forêts, ainsi que l'effet de ces prélèvements sur l'expansion en stock apparaît comme important pour la mise en place d'une gestion durable, à large échelle spatiale, de la forêt française.

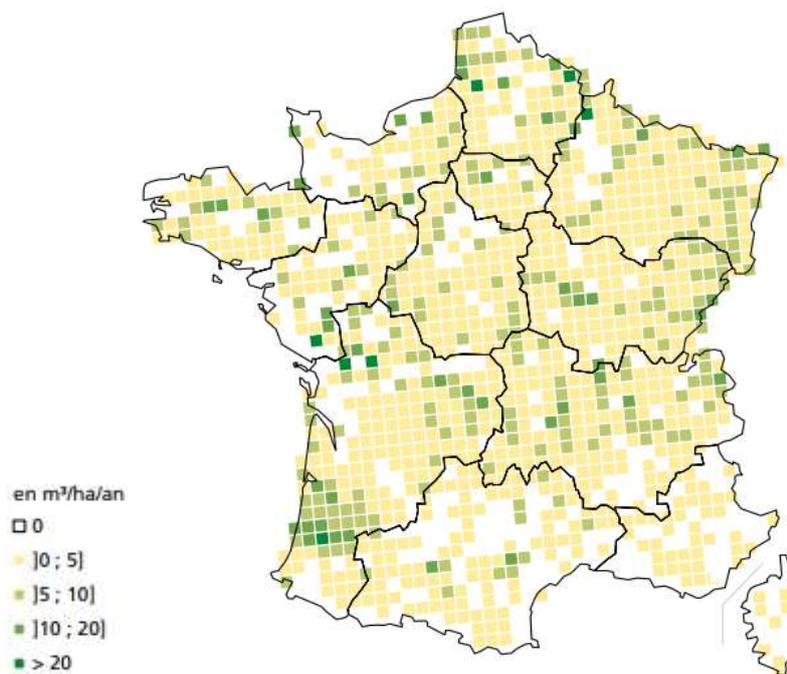


Figure 1.14. Prélèvements moyens de bois en forêt de production sur la période 2007 à 2015 (hors chablis Klaus ; source : IGN ⁶)

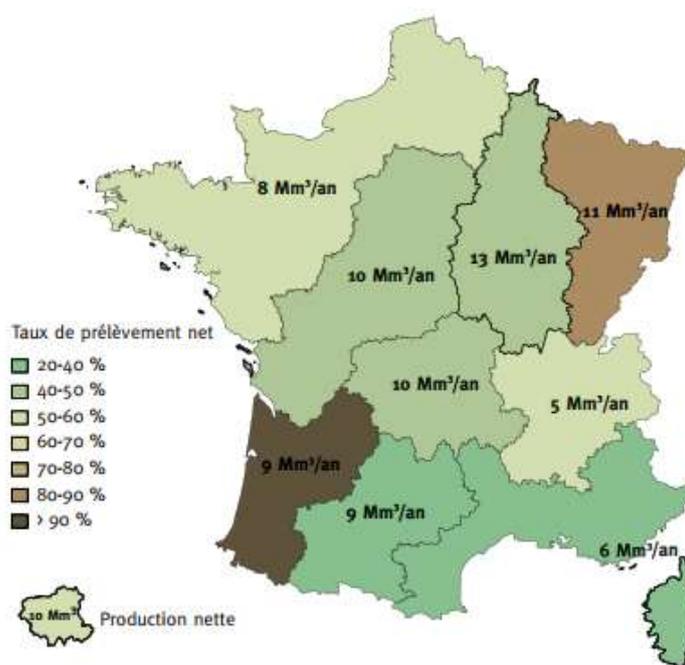


Figure 1.15. Taux de prélèvement net dans les forêts françaises selon les 9 interrégions (d'après les données IGN pour la période 2005-2009 ; source : Peyron et Hervé, 2012). Le taux de prélèvement net correspond à prélèvements/(production-mortalité)).

⁶ <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article765>

2.3.3 Conversion des taillis-sous-futaie (TSF) en futaie

Au début du XIX^{ème} siècle, une proportion importante des forêts feuillues françaises étaient traitées en taillis ou en TSF (respectivement 24 et 37% de la surface forestière totale en 1908 ; Daubrée, 1912). Le premier directeur de l'école forestière de Nancy, Bernard Lorentz, lance la politique de conversion de ces forêts en futaie (Bontemps, 2006) dans les années 1930, afin d'augmenter la disponibilité en bois d'œuvre des forêts françaises. Cependant, la pression sur le bois énergie est forte et freine les conversions. Il faut attendre 1848 et la modernisation de l'industrie pour voir cette pression diminuer (Degron, 1998). Une première phase de conversion s'effectue alors d'abord dans les forêts domaniales (Bastien, 2001). En 1878, 290 000 ha étaient déjà concernés par les conversions dans les forêts domaniales (Schaeffer, 1949). Une deuxième phase sera lancée à partir de 1880 (Bastien, 2001) avec une extension à toutes les forêts domaniales et aux forêts communales, plus lente cependant pour ces dernières du fait de la réticence des populations quant à la perte du droit d'affouage (Bourgenot, 1976). D'après les données de l'IFN (**Tableau 1.2**), le stock sur pied actuel des futaies régulières ou irrégulières est plus important que celui des taillis et des TSF. **La conversion a donc probablement entraîné une augmentation du stock sur pied, au moins à long terme.**

Structure	Densité de stock moyen (m ³ /ha)
Futaie régulière	212
Futaie irrégulière	171
TSF	148
Taillis	69

Tableau 1.2. Moyenne des volumes à l'hectare selon le type de structure (données IFN, entre 2007 et 2012)

2.3.4 Rôle des tempêtes majeures

Le terme « tempête » signifie « violente tourmente atmosphérique » (Larousse⁷). Ce mot regroupe donc aussi bien les tempêtes de neige que de grêle ou de sable. Cependant, les vents sont les agents les plus menaçants pour les peuplements forestiers. Le risque de chablis apparaît avec des vents de plus de 120 km/h (Tabeaud, 1993 ; Marnezy, 1991). On ne s'intéressera donc ici aux tempêtes qu'à travers leur vitesse de vent.

La France se trouve dans la partie d'Europe la plus exposée aux tempêtes d'un point de vue général (Forest Europe, 2015). Depuis le début du XX^{ème} siècle, on relève trois tempêtes remarquables (*i.e.* dont les dégâts causés sont supérieurs à 10 millions de m³) : en 1982

⁷ <http://www.larousse.fr/>

(dégâts de 12 millions de m³ ; Guillard, 1983), 1999 (176 millions de m³ ; Ministère de l’agriculture, 2005) et 2009 (43 millions de m³ ; IFN, 2009). Ces volumes à terre sont considérables. Si l’on inclut les dégâts diffus, le volume mis à terre par la tempête de 1999 équivaut à trois fois la récolte moyenne annuelle française (IFN, 2003). De ce point de vue, les dégâts causés par cette tempête marquent une rupture, étant donné le caractère géographiquement systématique des dégâts causés sur le territoire forestier. Les données présentant les dégâts causés par ces tempêtes sont au grain départemental pour 1982, régional pour 1999 et 2009 (sauf la Lorraine en 1999, séparée par départements ; Guillard, 1983 ; Direction des forêts, 1987 ; Doll, 2000 ; IFN). Les zones les plus touchées par ces tempêtes se trouvent principalement sur la diagonale Sud-Ouest-Nord-Est du pays (**Figure 1.16**).

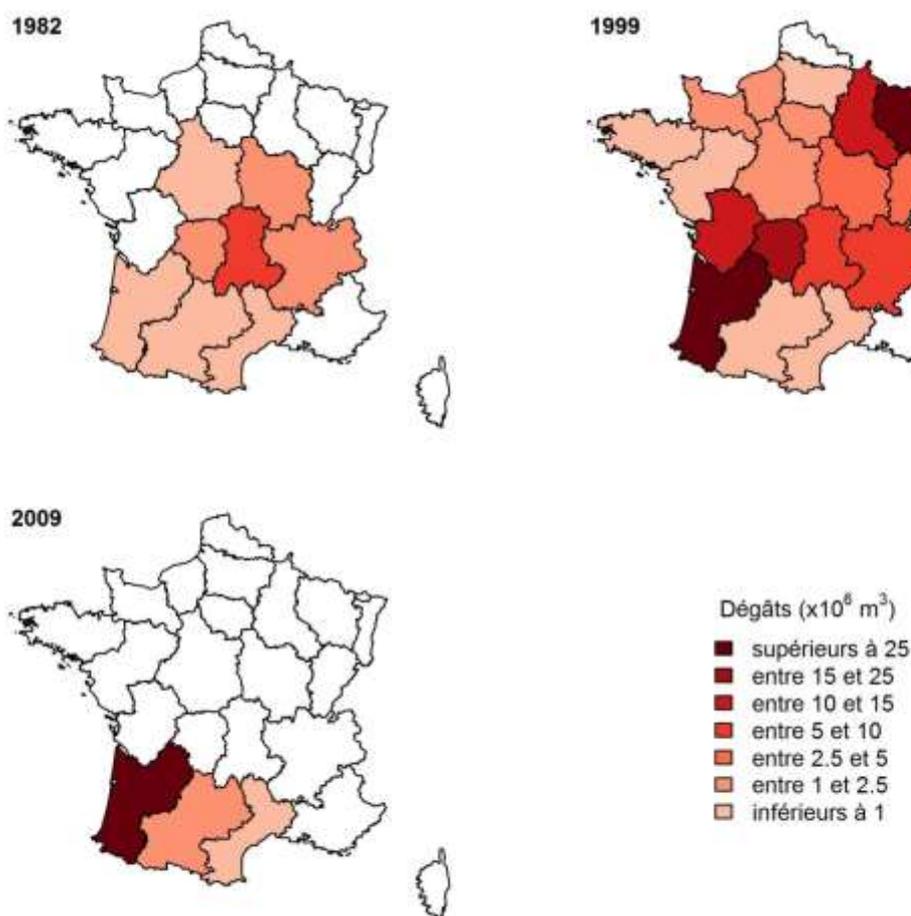


Figure 1.16. Dégâts causés par les tempêtes de 1982, 1999 et 2009 exprimés en volume de bois. Sources : Direction des forêts, 1987 ; Doll, 2000 ; IFN, 2009

En absolu, la tempête a plus touché les forêts privées (90,8 contre 47,5 millions de m³ pour le public ; **Tableau 1.3**). Cependant, si l’on compare ces chiffres aux volumes actuels des forêts publiques et privées donnés par l’IFN, cette tempête a quasiment touché de façon identique

les deux types de propriété. Aucun type de propriété dans ces régions ne semble donc plus sensible face aux vents.

Malgré l'importance du stock touché par ces tempêtes, les dégâts comptabilisés en 1892, 1999 et 2009 représentent respectivement seulement 0,4, 6,6 et 1,6% du volume actuel des forêts françaises et semblent relativement négligeables, à l'échelle nationale, par rapport à l'expansion de +35 millions de m³/an (Forest Europe, 2015).

Régions	Volume touché (Morel, 2003) (x10 ⁶ m ³)			Volume sur pied avant 1999 (IFN) (x10 ⁶ m ³)		part du volume public touché (%)	part du volume privé touché (%)
	Forêts publiques	Forêts privées	Total	Forêts publiques	Forêts privées		
Lorraine	22,4	7,1	29,5	123,9	54	18,1	13,2
Poitou- Charentes	0,7	11,3	12	4,3	40,5	16,4	27,9
Aquitaine	1	26,7	27,7	23,8	226,6	4,2	11,8
Limousin	1,1	15,3	16,4	2,7	79,7	40,6	19,2
Champagne- Ardenne	6,4	7,4	13,8	45,4	66,5	14,1	11,1
Auvergne	1,3	5	6,3	18,5	95,8	7,0	5,2
Ile-de-France	1,2	1,4	2,6	14,8	27,7	8,1	5,0
Rhône-Alpes	0,9	5,7	6,6	64,6	165,4	1,4	3,4
Alsace	5,5	1	6,5	58,5	16,2	9,4	6,2
Bourgogne	1,8	2,7	4,5	42,9	90,1	4,2	3,0
Franche- Comté	2,5	1,9	4,4	81,7	61,5	3,1	3,1
Basse- Normandie	0,6	1,4	2	6,3	16,5	9,5	8,5
Haute- Normandie	0,8	1,1	1,9	13,1	21,5	6,1	5,1
Centre	0,4	1,2	1,6	21,1	91,9	1,9	1,3
Picardie	0,3	0,6	0,9	15	30,9	2,0	1,9
Pays de la Loire	0,1	0,5	0,6	5,8	31,1	1,7	1,6
Languedoc- Roussillon	0,2	0,3	0,5	25,7	48,3	0,8	0,6
Bretagne	0,1	0,2	0,3	3,6	38,3	2,8	0,5
Midi- Pyrénées	0,1	0,3	0,4	33,5	102,2	0,3	0,3
Total	47,4	91,1	138,5	605,2	1304,9	7,0	7,8

Tableau 1.3. Estimation du volume de chablis des tempêtes de 1999 par région touchée et par type de propriété. Les données IFN sont calculées à partir des données des derniers inventaires antérieurs à 1999.

2.3.5 Incendies de forêt, une contribution encore anecdotique

La France est le quatrième pays d'Europe le plus touché par les incendies, loin derrière l'Espagne, le Portugal et l'Italie (Forest Europe, 2015). Cependant, ces incendies sont principalement localisés dans le Sud-Est du pays. 80% des surfaces brûlées se trouvent dans seulement quinze départements français (Tabeaud, 1993). Chaque année, on comptabilise en moyenne 4 000 départs de feux et 24 000 ha incendiés (moyenne entre 1985 et 2008 ; Magnier, 2011), représentant un peu plus du millième de la surface forestière. Cette moyenne est en diminution. Chautrand annonçait en 1974 une moyenne de 35 000 ha/an.

Les dégâts des incendies sont chiffrés en nombre d'hectares parcourus, et posent deux difficultés. Premièrement, un incendie ne va généralement pas avoir d'effet sur la surface, seulement sur les volumes : une zone forestière incendiée redeviendra généralement forestière par la suite. Deuxièmement, les surfaces incendiées ne correspondent parfois pas seulement aux surfaces forestières, d'autres types de végétation (landes, prairies...) pouvant être inclus dans les surfaces inventoriées. Il est alors impossible de connaître la surface boisée incendiée. Depuis le début du XX^{ème} siècle, 9 années peuvent être considérées comme exceptionnelles (*i.e.* surfaces incendiées supérieure à 50 000 ha ; **Tableau 1.4**). Cependant, avant 1973 et la mise en place de la base de données sur les incendies de forêts en région méditerranéenne, « Prométhée » (alimentée par le Service Départemental d'Incendie et de Secours –SDIS–, la Direction Départementale des Territoires et de la Mer, l'Office National des Forêts –ONF–, la gendarmerie et la police ; Alexandrian et Gouiran, 1990) aucun suivi des surfaces incendiées n'était vraiment effectué et certaines informations peuvent être manquantes. La période la plus remarquable est celle entre 1941 et 1949. Entre 1941 et 1947, 390 000 ha ont été incendiés dans les Landes (Mercier, 1974) et 130 000 ha en 1949 (Dorlance, 1975).

Il est important de remarquer qu'en touchant, au maximum, 2,5% de la surface forestière actuelle française (pour l'incendie des Landes entre 1941 et 1947), les incendies de forêt ont un impact minime sur le stock sur pied des forêts françaises, celui-ci n'étant pas complètement détruit par l'incendie.

Année ou période	Zone	Superficie brûlée (ha)
1941-1947	Landes	390 000
1949	Gironde	130 000
1965	France	59 716
1970	France	61 230
1973	France	65 101
1976	France	52 752
1978	France	57 000
1989	France	56 871
1990	France	53 897
2003	France	61 506

Tableau 1.4. Surfaces incendiées lors des années ou périodes exceptionnelles. Source : Dorlanne, 1975 ; Blais, 1974 ; Bazire et Gadant, 1991 ; Faure, 1987 ; Clément et Jappiot, 2005 ; Clément, 2004 ; Mercier, 1974. Dans le cas où pour une même année, la littérature présentait plusieurs surfaces incendiées, la plus petite a été retenue. Il était ainsi considéré que la plus petite surface correspondait aux surfaces strictement boisées.

2.3.6 Les dépérissements, un effet ciblé difficile à quantifier

Le Département de la Santé des Forêts (DSF), créé en 1989, effectue un suivi des dépérissements observés dans les forêts françaises. Avant sa création, aucun suivi n'était effectué. Les seules informations trouvées dans la littérature correspondent alors généralement à des événements marquants à l'échelle du massif ou de la région.

On peut retenir cependant certains événements comme l'action couplée de la cochenille *Matsucoccus feytaudi* et d'insectes xylophages (*Pissodes notatus* et *Myelophilus piniperda* entre autres) qui a détruit environ 120 000 ha de Pin maritime dans les années 1960-1970 dans la région des Maures et de l'Esterel (Schvester, 1985 ; Tabeaud et Simon, 1993 ; Riom, 1994). A partir des années 90, des attaques de Bombyx disparate (*Lymantria dispar*) ont causé la mort de nombreux chênes sessiles et pédonculés. Ces mortalités ont surtout été observées en forêt indivise de Haguenau (40 000 m³ récoltés en 1995 ; Landmann, 1996) et dans des forêts du Centre-Ouest (Deux-Sèvres, Indre, Maine-et-Loire et Vienne) majoritairement en forêt privée (Landmann, 1998). Dans ces dernières, il a été estimé à environ un million de mètres cube la quantité de bois morts ou fortement dépérissant en 1997 (Landmann, 1999). En 2002, Landmann rapporte une surface de 40 000 ha de chênaie défoliée en Corse en 2001.

Depuis 2008, la chalarose (chalarose ; *Hymenoscyphus fraxineus*) attaque fortement les frênes (*Fraxinus excelsior* et *Fraxinus angustifolia* ; Goudet et Piou, 2012). Cette maladie qui a tout d'abord été observée en Pologne en 1990 a été repérée pour la première fois en 2008 en

Haute-Saône et s'étend depuis sur toute la moitié Nord de la France arrivant en 2016 jusqu'à Rennes (DSF, 2016).

L'effet des dépérissements est impossible à quantifier sur le long terme et à l'échelle nationale. Bien qu'ils aient pu avoir un effet fort sur une essence en particulier, ils ne semblent pas avoir eu d'effet fort quant au stock total des forêts françaises.

2.3.7 Conflits armés

Les deux guerres mondiales ont eu, de par les boisements qui ont été effectués par la suite, un effet positif sur les surfaces boisées. Cependant, ces guerres ont aussi eu un impact négatif sur le stock sur pied.

Après la première guerre mondiale, 653 000 ha boisés sont considérés touchés par la guerre (Amat, 1999). Parmi ces forêts, 350 000 ha de forêts au niveau de la zone de combat et des régions envahies sont considérés comme inaptes à la production de bois d'œuvre avant 60 ans (Dabat, 1920), traduisant leur fort appauvrissement. Onze départements ont été directement touchés (Aisne, Ardennes, Marne, Meurthe-et-Moselle, Meuse, Nord, Oise, Pas-de-Calais, Somme, Vosges, Territoire de Belfort ; Amat, 1999). Forget estime à 120 000 ha la surface forestière endommagée pour le seul département de la Meuse (Amat, 1999). En arrière du front, le bois a été fortement utilisé pour construire les emménagements de guerre. D'après l'ONF, il fallait 3 000 tonnes de bois (*i.e.* environ 10 ha) pour aménager les ouvrages militaires de seulement 1 km². Ceci a entraîné une exploitation anticipée des forêts soumises d'un an en région Centre mais de près de 10 ans en région parisienne, plus proche du front (Puyo, 2004).

Lors de la seconde guerre mondiale, le gouvernement de Vichy veut augmenter la mobilisation des ressources forestières. Il met en place le 8 août 1940 une loi obligeant les propriétaires de plus de 10 ha de forêt à augmenter leurs prélèvements de 50% par rapport à la normale (Pearson, 2007). Pendant toute la période d'occupation, cette surexploitation de la forêt a conduit à une exploitation anticipée moyenne de 2 ans pouvant aller jusqu'à 10 ans dans certaines forêts de la région parisienne. D'après l'administration des forêts, 30 millions de m³ de bois d'œuvre et d'industrie ont été dégradés par des « actes de guerre ». Il est à remarquer que cela ne représente même pas l'accroissement de stock en une année des forêts françaises. Les forêts touchées sont plus dispersées que pendant la première guerre mondiale, les plus fortement touchées se trouvant dans les Landes (Pearson, 2007).

2.3.8 Difficulté à quantifier l'impact des différents facteurs

L'étude des facteurs des changements de volume de la forêt française est freinée par des problèmes de définition. Par exemple, il semble y avoir une confusion entre certains termes comme « surfaces incendiées » et « surfaces forestières incendiées ». Ces confusions amènent à trouver dans la littérature des chiffres très différents pour les mêmes phénomènes. Il faut donc rester prudent face aux valeurs relevées.

De plus, l'étude se heurte à un manque d'information. Les données récoltées sont généralement des données nationales ou régionales mais très rarement des données à un grain plus fin comme celui du type de propriété ou du département. Une étude précise des causes de l'expansion est donc difficile. De plus, plus l'évènement est ancien, plus il est difficile de trouver des informations chiffrées le concernant. Certains organismes et bases de données se sont mis en place au cours du XX^{ème} siècle afin de palier à ce manque d'information. C'est le cas, par exemple, de la base de données « Prométhée » qui recense les incendies en Méditerranée, mise en place en 1973.

Des phénomènes plus diffus dans le temps que les tempêtes et les incendies ont aussi un impact sur les volumes forestiers. On peut citer, par exemple, les attaques biotiques ou les périodes de sécheresse. Il est cependant très difficile de les connaître avec précision et d'avoir un véritable bilan de leurs effets. De plus, leurs effets, parfois couplés entre eux ou à d'autres évènements, sont difficiles à individualiser.

3 Contribution des données IFN et des statistiques anciennes à l'analyse de la dynamique forestière

3.1 Données IFN

Les inventaires forestiers nationaux, initiés dans les années 1920 dans les pays scandinaves, se sont mis en place dans tous les pays développés forestiers (Tomppo *et al.*, 2010). Ils permettent d'avoir une image de la surface forestière mais aussi, de son stock et de sa production. Ainsi, des chronologies d'expansion en stock ont été produites sur le long terme et à un grain national pour quelques pays (Egnell *et al.*, 2011 en Suède ; Henttonen *et al.*, 2017 en Finlande ; Smith *et al.*, 2002 aux Etats-Unis ; Pignard, 2000 en France sur les dernières décennies).

En France, l'Inventaire Forestier National français (IFN) a été créé en 1958 (Bazire, 1984) et les premiers inventaires disponibles datent de 1961. Ces données ont l'avantage d'être localisées géographiquement, au moins au plan départemental, permettant un suivi spatial en plus d'un suivi temporel. Pignard (2000) a montré, en utilisant les données de l'IFN, que les augmentations de surface ont été plus fortes en Bretagne et dans le Sud-Est. Alors que les futaies ont connu une nette progression, les taillis et les mélanges futaie-taillis ont vu leur surface diminuer. Alors que l'augmentation absolue de la surface des forêts feuillues a été plus forte que celle des forêts résineuses, le rythme relatif de progression des forêts résineuses est plus soutenu (+5,4% en 11 ans pour les résineux contre +4,2% pour les feuillus). Parmi les feuillus, c'est le chêne vert qui a présenté la plus forte progression alors que chez les résineux, c'est le douglas. Le stock sur pied s'est lui principalement accumulé dans les forêts privées

qui ont vu leur volume à l'hectare progresser fortement mais en restant toujours inférieur à celui des forêts publiques.

En plus de renseigner sur les surfaces et les volumes forestiers, l'IFN français renseigne aussi sur des variables dynamiques associées aux populations d'arbres comme la mortalité, la croissance et le recrutement de nouvelles tiges, permettant d'approcher les causes de l'expansion. Des études basées sur ces données ont permis une première description de l'accroissement du stock de bois sur pied (Pignard, 2000) par département, structure forestière, composition et propriété mais ces explorations sont encore réduites dans le temps (1981-1991 pour Pignard, 2000) et n'abordent pas les causes de ces changements.

En Finlande, Henttonen *et al.* (2017) ont étudié le lien entre les facteurs environnementaux et l'augmentation de la croissance en utilisant les données de croissance de l'inventaire forestier finlandais. Leurs résultats ont permis de montrer que 14% de l'augmentation du volume total annuel à la fin de la période d'étude était dus à l'environnement ainsi que 37% de l'augmentation totale.

3.2 Statistiques anciennes

Les premiers inventaires de l'IFN ont été effectués en 1961. Ainsi, aucune lecture sur un plus long terme de la dynamique forestière ne peut se faire sans d'autres données. En France, de nombreuses données anciennes décrivent la surface forestière de la France avant la mise en place de l'IFN (Brénac, 1984). Cependant, pour une étude approfondie des patrons de l'expansion, il est important d'avoir des données à un grain plus fin que le grain national.

La première statistique forestière exhaustive des forêts françaises est celle de Daubrée (1912). La comparaison des données de cette statistique à celles de l'IFN permet d'étudier la dynamique forestière sur l'ensemble du XX^{ème} siècle. De plus, les données de surface sont ventilées par cantons, type de propriété, essence et mode de gestion. Ainsi, la statistique Daubrée se présente comme indispensable pour notre étude.

Cependant, peu d'informations sont disponibles sur la manière dont ces données ont été récoltées. Il semble donc indispensable de pouvoir comparer les résultats de cette enquête à d'autres données anciennes. Les statistiques agricoles de 1892 et 1929, basées sur les données du cadastre, ne sont pas des statistiques à vocation principalement forestière mais une section est tout de même dédiée à la forêt. Les résultats de surface sont ventilés par département, type de propriété et mode de gestion. L'utilisation de ces données permet à la fois de comparer leurs résultats à ceux de l'enquête Daubrée et vérifier la plausibilité de ceux-ci par encadrement, et une image de la dynamique surfacique des forêts française au début du XX^{ème} siècle.

Nous avons donc choisi de travailler avec les données de l'IFN et ces trois jeux de données anciennes. Cependant, ces données ne présentent aucune description des volumes forestiers.

Aucune information du volume des forêts françaises avant la mise en place de l'IFN n'est disponible. Il est donc indispensable de les estimer.

4 Lacunes identifiées

Pourtant pertinente pour l'élaboration des futures politiques forestières, l'étude de l'expansion forestière a été peu abordée en France. Cette expansion est en bonne partie spontanée et non-contrôlée, ce qui peut expliquer la faible quantité d'information à son égard. Une analyse poussée de ces phénomènes apporterait cependant des informations primordiales sur la dynamique passée des forêts, permettant de mieux prédire celle future et de mieux utiliser la ressource.

La transition forestière a été définie comme un changement de surface. Ainsi, elle a été dans un premier temps étudiée en ne prenant pas en compte les évolutions du stock. Cependant, il est très important d'un point de vue forestier de comprendre les évolutions du volume de bois sur le long terme pour l'élaboration de politiques cohérentes de gestion durable des forêts au niveau national. L'étude de ces changements demande de comprendre les patrons de cette expansion et les mécanismes sous-jacents (exemple croissance forte, prélèvements et mortalité élevée) afin d'approcher l'effet de différentes causes (gestion, politiques de boisement, accrus spontanés) sur les changements observés et ainsi pouvoir mieux prédire l'évolution future des forêts.

Avant la création de l'IFN en 1958, aucune information sur l'état de la forêt française n'était délivrée régulièrement. Ce manque de données peut expliquer, en partie, que l'analyse sur le long-terme de l'expansion des forêts françaises n'ait été que peu abordée. Cependant, au tournant des XIX^{ème} et XX^{ème} siècles, la statistique Daubrée (1912), première enquête forestière à visée exhaustive, ainsi que les statistiques agricoles décennales (1892 et 1929) apportent une image de l'état de la forêt en France. Ces inventaires et enquêtes sont des sources d'informations essentielles pour la reconstitution de l'évolution de la forêt française. Néanmoins, ces statistiques anciennes n'apportent d'informations que sur la surface forestière et non sur le stock sur pied. L'analyse de l'expansion du stock sur pied est donc plus délicate que celle des surfaces. Ce manque d'informations anciennes de stock sur pied entraîne un besoin d'estimation de ce stock au début du XX^{ème} siècle.

La définition de la forêt diffère d'un inventaire à un autre (taille, taux de couvert, *etc.*). Fourchy (1944) explique que l'ambiguïté entre forêt, terrain nu, landes et pâture porte surtout sur la densité du peuplement. Certaines zones identiques étaient d'ailleurs classées dans le cadastre soit dans la catégorie « bois », soit dans « pâtures », soit dans « terres vaines ». Il a fallu attendre 2005, pour que l'IFN adopte la définition internationale de la forêt (FAO, 2004). Du fait de ces incertitudes, il est difficile de remonter dans le temps. Ces changements de définitions et l'absence de données anciennes de stock expliquent que l'expansion sur le long terme n'ait été que peu étudiée.

5 Objectifs de la thèse

Cette thèse se focalise sur la dynamique des forêts française depuis la mise en œuvre du programme d'inventaire forestier, avec une extension exploratoire jusqu'au début du XX^{ème} siècle. Sur cette période, la forêt française est dans une phase d'expansion de surface. Cependant, alors que les changements de surface ont déjà été largement analysés, notre travail se concentre principalement sur l'expansion en stock sur pied. L'objectif est, avant tout, de comprendre cette dynamique passée des forêts. Elle se base sur l'idée que pour prédire la dynamique future des forêts, il est nécessaire de comprendre d'abord la dynamique passée. Notre travail est donc une étape dans la réalisation de modèles de l'évolution future des forêts françaises.

Le premier objectif sous-jacent est de qualifier et quantifier cette expansion en surface et en stock sur pied (partie III). Cette étude est faite selon un découpage prenant en compte à la fois la géographie et la gestion des forêts et permet de comprendre les patrons de l'expansion forestière française, de voir si une saturation de cette expansion est déjà visible ou non et d'analyser l'effet de l'augmentation passée des surface et de la densité de stock sur les changements de stocks sur pieds.

Les changements de stock peuvent être liés à plusieurs facteurs (augmentation de la productivité, diminution des prélèvements, tempêtes, *etc.*). Il est possible d'approcher l'effet de ces facteurs à partir de l'étude de flux de stock sur pied (croissance, recrutement, prélèvement et mortalité). Le deuxième objectif est donc de comprendre les processus liés à l'expansion en stock à partir de l'étude de flux de surface terrière (partie IV).

Enfin, l'étude sur le long terme de l'expansion en stock des forêts françaises n'est pas possible à cause du manque de données anciennes de stock. Certaines informations disponibles permettent cependant d'avoir une idée de l'état très peu capitalisée des forêts au XIX^{ème} siècle (Mather *et al.*, 1999). Le troisième objectif est donc d'estimer les volumes au début du XX^{ème} siècle (1892, 1908 et 1929) en utilisant les données de l'IFN et de modéliser sur le long terme (1850-2010) la dynamique passée du stock sur pied des forêts françaises (partie V

II - Les données de surface et de stock de bois sur pied des forêts françaises issues de l'inventaire forestier national et de statistiques anciennes

1 Introduction

L'étude de la dynamique de la surface et du stock sur pied des forêts françaises a été réalisée à partir de deux ensembles de données : les données de l'inventaire forestier national (IFN) et celles de statistiques anciennes de la fin du XIX^{ème} siècle et du début du XX^{ème} siècle (statistiques agricoles de 1892 et 1929 et statistique Daubrée de 1908). Les données de l'IFN ont connu une rupture majeure de plan de sondage, passant d'un inventaire départemental décennal et désynchronisé depuis 1961 jusqu'à 2005 à un inventaire national systématique annuel par la suite (Hervé *et al.*, 2014 ; IGN, 2014). Cette multiplication des sources des données et de méthodes a nécessité un important travail d'appropriation et d'homogénéisation de ces données.

Pour analyser la localisation des changements étudiés, nous avons décidé de travailler soit à l'échelle départementale, soit à celle des régions écologiques identifiées par l'IFN (Grandes Régions ECOlogiques ou GRECO ; IFN, 2011a). Alors que l'échelle départementale apporte une précision spatiale plus importante (90 départements IFN contre 11 GRECO), les GRECO ont l'avantage de présenter une homogénéité d'un point de vue climatique, géologique et topographique (Cavaignac, 2009) et ainsi permettre d'étudier l'effet de ces facteurs sur l'expansion. Cependant, les limites de ces régions ne correspondent pas à celles des départements et une analyse par GRECO n'est donc pas envisageable avec l'inventaire départemental de l'IFN, au moins dans une première période (1961-1982) où les coordonnées géographiques exactes des points d'inventaire ne sont pas documentées, et où on ne possède d'information que pour le département d'appartenance. Un travail de rattachement de chaque département à une GRECO a donc dû être effectué.

Le changement de méthode de l'IFN a également entraîné des changements au niveau de la définition des surfaces forestières. Il est important de bien comprendre ces changements pour utiliser de façon appropriée les deux jeux de données, avant et après 2005, conjointement.

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps les différentes données utilisées et leur homogénéisation. Ensuite, deux études préliminaires sur les données sont introduites : le rattachement des départements aux GRECO et l'analyse des changements de surface entre les deux méthodes d'inventaire.

2 Présentation des données

Deux types de données ont été utilisées pour nos études : les données de l'IFN (depuis 1961) et des données provenant de statistiques anciennes (statistiques agricoles de 1892 et 1929 et statistique Daubrée en 1908). Nous présentons tout d'abord les différents types de données utilisées puis la façon dont ces données ont été homogénéisées pour permettre une lecture séculaire des phénomènes de dynamique forestière.

2.1 L'inventaire forestier national

La mission d'inventaire forestier a été créée en 1958 sur ordonnance du Général de Gaulle et a été initiée en 1961, avec le département de la Gironde. L'inventaire forestier a pour mission d'inventorier de façon permanente l'ensemble des ressources forestières françaises publiques et privées. Il apporte une connaissance à la fois de la surface des forêts françaises mais aussi du stock sur pied et de la production des forêts.

Seule la forêt dite de production (*i.e.* forêt dont le terrain permet la production de bois et dont rien n'empêche la production) a été prise en compte dans notre étude. Cette forêt représente actuellement 95% de la surface forestière totale (16 millions d'hectares).

2.1.1 Méthodes d'inventaire et bases de données

L'inventaire, basé sur des placettes temporaires, a été, dans un premier temps, départemental (« ancienne méthode » ou AM ; **Figure 2.1**), chaque département étant inventorié de façon indépendante et non-synchrone environ tous les 10 ans. Il est devenu national (« nouvelle méthode » ou NM) en 2005. Un seul inventaire départemental AM a été effectué après 2004 (inventaire du département du Loiret en 2006).

Afin d'étendre au maximum la période d'étude, une base de données informatique ancienne, appartenant à l'AM, relative aux premiers cycles de l'inventaire forestier et remontant jusqu'en 1971 (dit base « archéodendro ») a été mobilisée, ainsi que des tableaux de résultats départementaux standards (dite base « paléodendro ») depuis l'origine (1961 ; **Tableau 2.1**). Dans le cadre de cette thèse, aucune information de composition provenant de ces données anciennes n'a pu être utilisée.

II - Les données de surface et de stock de bois sur pied des forêts françaises

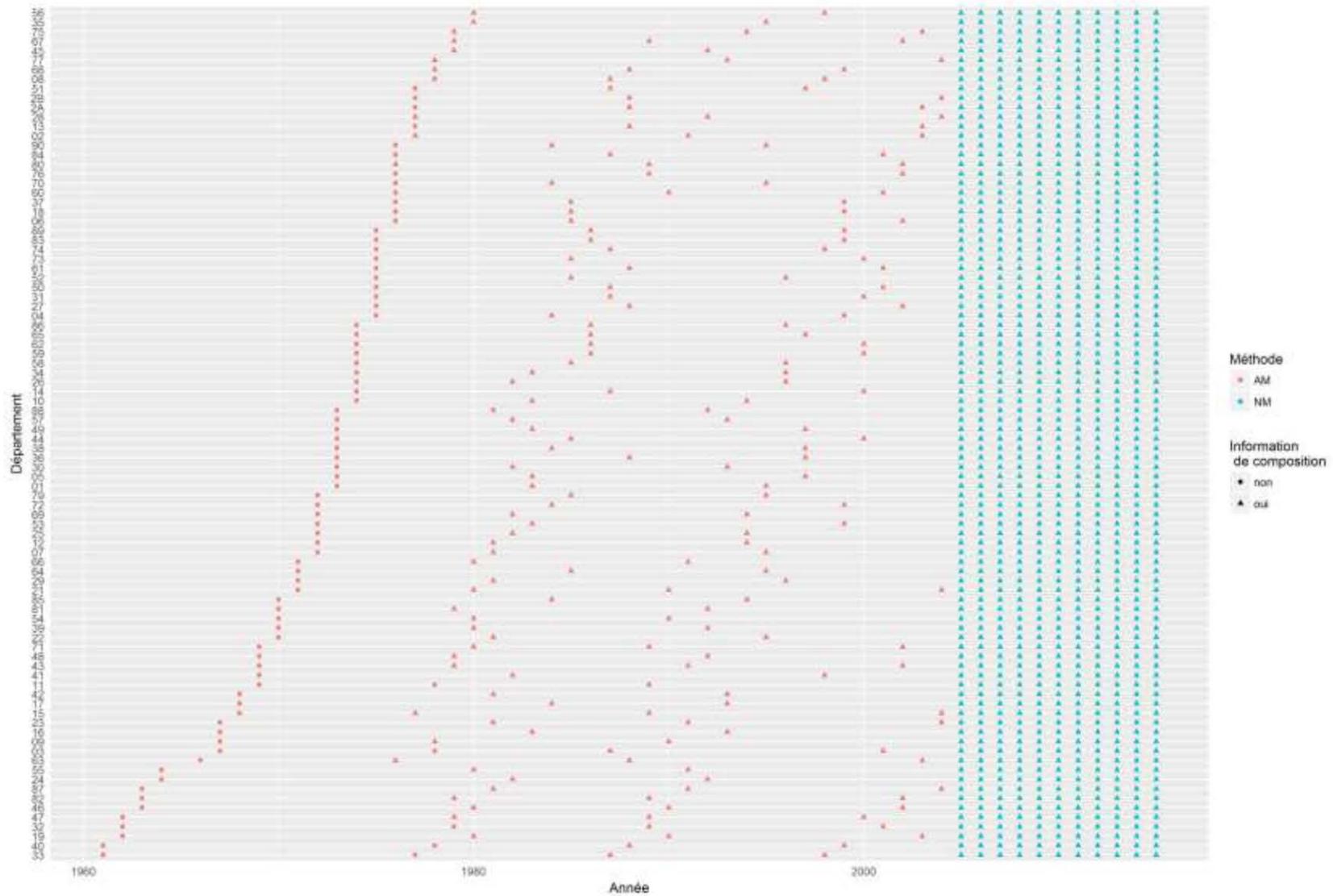


Figure 2.1. Années d'inventaire IFN des départements français et identification de leur base de donnée

Base de données IFN	Nombres			
	d'inventaires départementaux	Année initiale	Année finale	Année moyenne
Paléodendro	31	1961	1971	1967
Archéodendro	53	1971	1979	1975
Base de données courante (dendro)	199	1976	2006	1990

Tableau 2.1. Informations relatives aux différentes sources de données IFN avant 2005

2.1.2 La définition de la forêt et son évolution

Avant 2005, était considérée comme « formation boisée » toute formation végétale 1) occupant une superficie d'au moins 5 ares, 2) ayant une largeur en cime d'au moins 15 m, 3) étant soit « constituée de tiges recensables (diamètre à 1,30 m supérieur ou égal à 7,5 cm) dont le couvert apparent (projection de leurs couronnes sur le sol) est d'au moins 10% de la surface du sol » ou présentant « une densité à l'hectare d'au moins 500 jeunes tiges non recensables (plants, rejets, semis) vigoureuses, bien conformées et bien réparties » dont la hauteur à maturité *in situ* est de 7 m (IFN, 1985). A l'intérieur de ces formations, une différence était opérée entre forêts, boqueteaux et bosquets (**Tableau 2.2**). Les premières ont une surface supérieure à 4 ha et une largeur en cimes d'au moins 25 m. Les deuxièmes ont une surface entre 50 ares et 4 ha et une largeur moyenne en cimes supérieure à 25 m. Les derniers ont une surface comprise entre 5 et 50 ares et une largeur moyenne en cime supérieure à 15 mètres, et ne présentent pas de limite de surface quand leur largeur ne dépasse pas 25 m.

Lors de la mise en œuvre de la nouvelle méthode, l'IFN a adopté la définition internationale de la forêt définie par la FAO (FAO, 2004) comme étant un « territoire couvert à plus de 10% par des arbres (végétaux ligneux capables d'atteindre au moins 5 m à maturité *in situ*), d'une superficie d'au moins 50 ares et de plus de 20 m de large » (IFN, 2008). A ce titre, les bosquets (surface comprise entre 5 et 50 ares) ne font plus partie de la forêt. **on notera la très grande proximité existant entre cette définition actuelle, et la définition des boqueteaux et forêts de l'ancienne méthode d'inventaire, laissant supposer un lien entre inventaire français et définition FAO, sans que nous ayons pu formellement l'identifier. Cela favorise en effet grandement l'homogénéisation des données entre méthodes d'inventaire.**

		Surface	Largeur minimum en cime	Couvert minimum	Hauteur minimum des arbres à maturité
Avant 2005	Forêt	4 ha minimum	25 m	10%	7 m
	Boqueteau	Entre 50 a et 4 ha	25 m	ou	7 m
	Bosquet	Entre 5 a et 50 a Pas de condition de surface maximum pour tous les massifs avec une largeur en cime comprise entre 15 et 25 m	15m	densité à l'hectare d'au moins 500 jeunes tiges non recensables, bien vigoureuses, bien conformées et bien réparties	7 m
Depuis 2005		50 a minimum	20 m	10%	5 m

Tableau 2.2. Définition de la forêt dans l'ancienne et la nouvelle méthode de l'Inventaire Forestier National

2.1.3 L'opération d'inventaire

2.1.3.1 Ancienne méthode

Avant 2005, un inventaire départemental était effectué en 3 à 5 ans. Il était composé de deux phases distinctes (**Figure 2.2**) :

- Un Sondage systématique sur photographies aériennes avec photo-interprétation des formations à inventorier (phase 1). Cette phase donne une première estimation de l'importance de chaque formation, et classer les points de sondage en points forestiers ou non.
- Un contrôle au sol (sous-échantillonnage) des classements de la phase 1 et un inventaire au sol des points appartenant à des formations forestières de production (description de la station et des arbres ; phase 2).

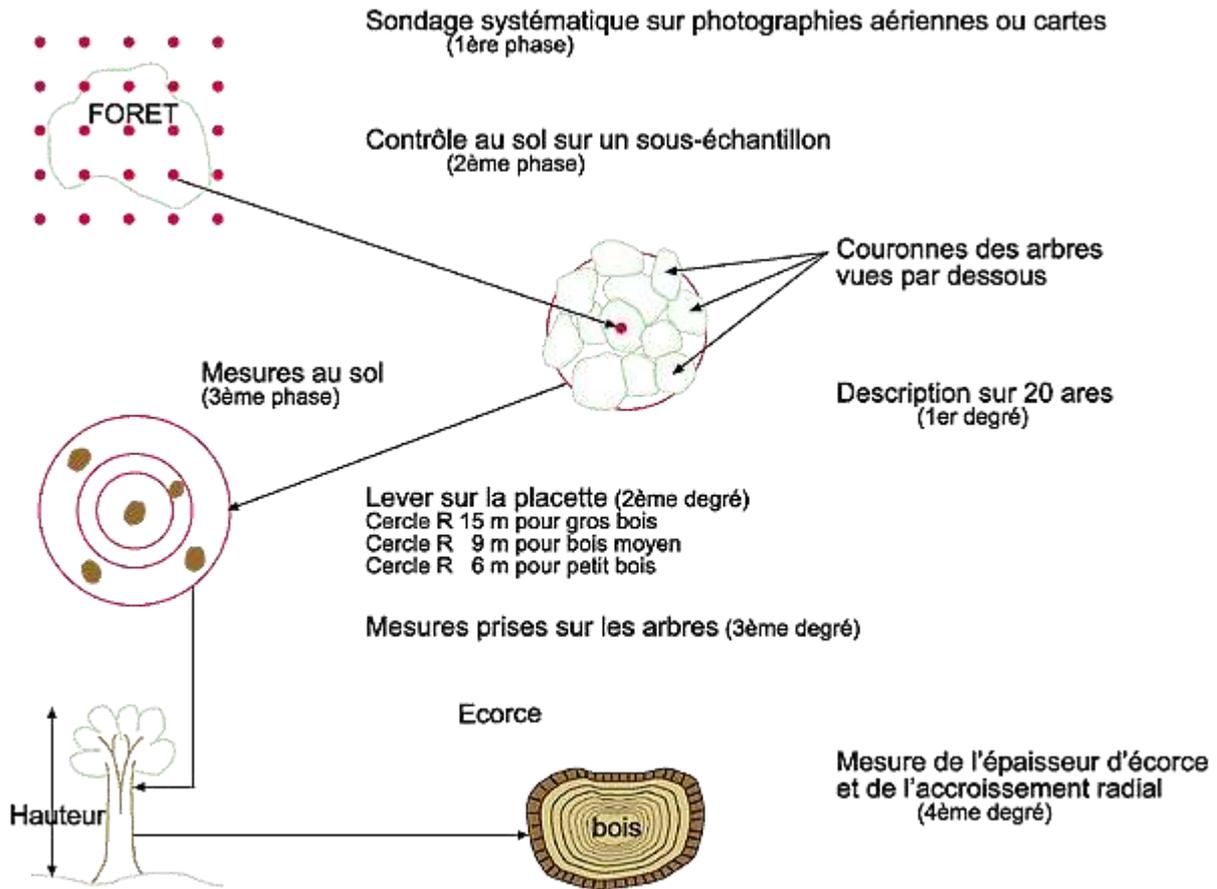


Figure 2.2. Méthode d'échantillonnage de la forêt française par l'IFN (source : IFN⁸).
La phase 3 qui apparaît sur ce document correspond aux relevés de terrain de la phase 2

2.1.3.2 Nouvelle méthode

Depuis 2005, l'ensemble du territoire est couvert selon un échantillonnage systématique se basant sur une grille de mailles carrées de 1 km de côté. Chaque année, un dixième du réseau est parcouru (1 point tous les 10 km², **Figure 2.3**). La grille est fractionnée en deux sous-grilles, formant ainsi deux sous-ensembles quinquennaux. Ainsi, le territoire est inventorié de façon uniforme dans le temps et l'espace. Chaque fraction annuelle comporte environ 6 000 points d'inventaire de phase 2, levés sur le terrain.

⁸ <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article344>

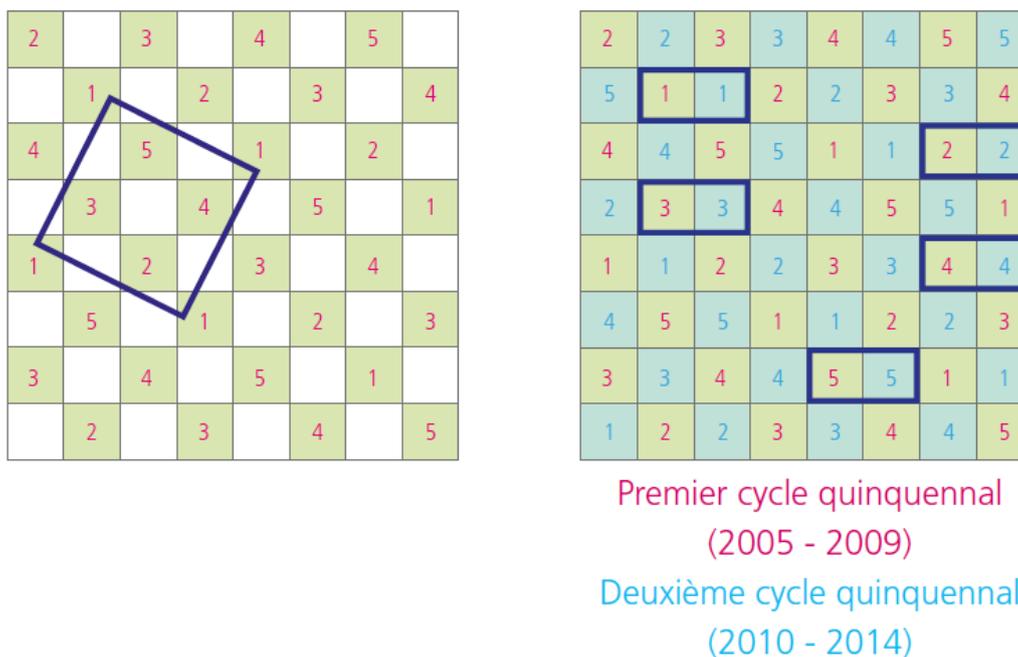


Figure 2.3. Echantillon complet nouvelle méthode systématique dans l'espace et dans le temps (Source : IGN⁹). Chaque numéro correspond à une fraction annuelle d'inventaire.

2.1.3.3 Levés de terrain

Le levé de terrain est composé d'une description du peuplement (structure, composition, *etc.*) sur une placette de 25 m de rayon, d'un relevé floristique à l'intérieur d'un cercle de rayon de 15 m, d'une description du sol au centre de la placette et de l'inventaire et la mesure des arbres sur des placette de 6 m (pour les arbres dont le diamètre à 1,30 m est compris entre 7,5 et 22,5 cm), 9 m (pour les arbres dont le diamètre à 1,30 m est compris entre 22,5 et 37,5 cm) et 15 m de rayon (pour les arbres dont le diamètre à 1,30 m est supérieur à 37,5 cm ; **Figure 2.4**).

Des nombreuses mesures ou caractéristiques sont relevées sur les arbres. Parmi celles-ci, on peut retenir :

- l'essence de l'arbre. Dans le cas général, l'essence désigne une espèce d'arbre forestier mais elle peut également faire référence à une sous-espèce ou variété présentant un intérêt particulier ou bien à un groupe d'espèces (exemple : « autre feuillu indigène »)
- son état de végétation (vivant ou mort)
- la circonférence à 1,30 m des arbres vivants dont le diamètre est supérieur à 7,5 cm

⁹ <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article765>

- l'épaisseur d'écorce
- l'accroissement radial cumulé de l'arbre sur les 5, 10 ou N (quand il n'était pas possible de lire les cernes sur les 5 dernières années, l'accroissement radial n'était relevé que sur les N années lisibles) dernières années (IR5, IR10 ou IRN). Ils sont mesurés directement sur le terrain à partir de la lecture de carottes prélevées perpendiculairement à l'axe du tronc de l'arbre. **Un aspect important est donc que les carottes de croissance à 10 ans devaient donc couvrir la durée théorique entre deux cycles d'inventaires départementaux de l'ancienne méthode, aux fins de reconstitution de la dynamique forestière. Par ailleurs, ces mesures ont été restreintes aux 5 dernières années en 2007, puisque l'inventaire annuel ne le rendait plus nécessaire.** L'accroissement radial permet de connaître la croissance des arbres mais aussi quels arbres ont été recrutés (*i.e.* ont atteint les 7,5 cm) dans les 10, 5 ou N dernières années.

Le volume étudié dans nos études correspond au volume « bois fort » de la tige, c'est-à-dire au volume sur écorce de la tige depuis le sol jusqu'à une découpe de 7 cm des arbres recensables (*i.e.* arbres dont le diamètre à 1,30 m est supérieur à 7,5 cm). L'estimation du volume est basée sur une base de données conséquente de mesures complètes de volume au niveau départemental avant 2005 et sur des tarifs de cubage nationaux à trois prédicteurs depuis (IFN, 2011b).

En plus d'information sur les données d'arbres vivants, les arbres prélevés et morts sont également relevés. La circonférence à la base et à 1,30 m (si possible) des arbres morts depuis moins de cinq ans est relevée. Avant 2005, le même principe était effectué pour les arbres prélevés. Depuis la mise en place de la NM, un « retour sur point » (notion de placette semi-permanente) a été mis en place cinq ans après afin de relever les arbres potentiellement coupés ou morts. Ainsi, la nouvelle estimation des prélèvements est plus précise car aucune estimation du temps depuis lequel l'arbre a été coupé n'est nécessaire mais elle décrit les prélèvements effectués cinq ans après l'inventaire terrain et non pas avant. **Seuls les relevés des années 2005 et 2006 ont utilisé les deux protocoles de relevé des arbres prélevés et peuvent permettre une comparaison de leurs résultats.** Il est important de remarquer que les arbres morts puis prélevés sont comptabilisés comme des arbres prélevés et non morts.

Parmi les données décrivant le peuplement, on peut retenir le taux de couvert libre relatif de chaque essence (TCLR) défini comme le rapport de la surface des houppiers ayant accès à la lumière sur la surface totale de la placette couverte par les houppiers des arbres. Cette donnée n'est disponible qu'en NM. Elle permet de connaître la composition en essence du point. Elle était relevée sur le terrain en AM afin de connaître l'essence principale (essence avec le plus fort TCLR) ou la composition (résineux/feuillus/mixtes) du peuplement mais n'est pas disponible en base. Une autre donnée synthétique, l'Importance-essence (IMPESSE) est

cependant disponible et basée sur les TCLR. Un essai de reconstitution des compositions identifiées en NM a été tenté à partir de cette donnée (voir partie IV – 2.1).

Alors que les données décrivant le peuplement comme la composition ou l'essence principale, peuvent être rapportées à une surface forestière, la donnée d'essence d'arbre (ou toute donnée de niveau arbre) décrit chaque arbre relevé et aucune surface ne peut y être rattachée.

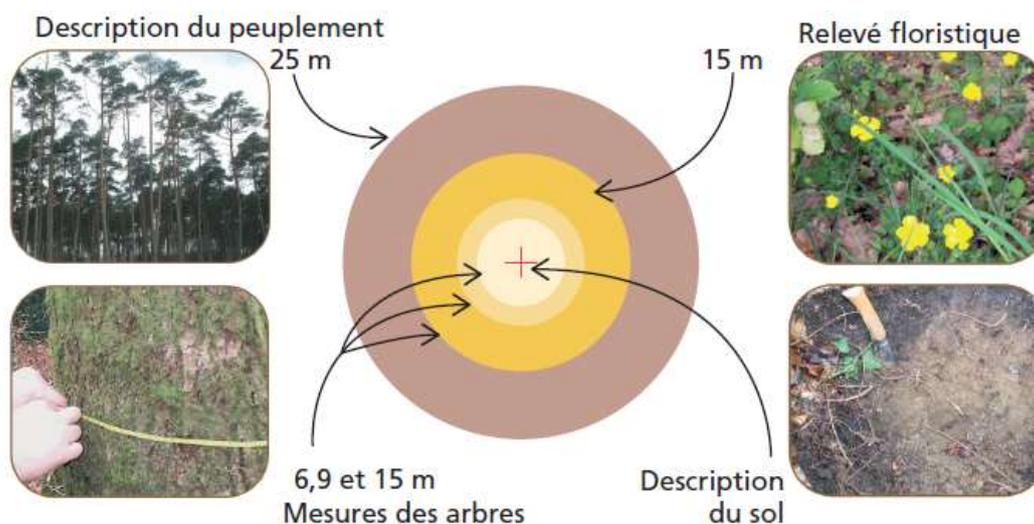


Figure 2.4. Observations et mesures sur les placettes en forêt de production (IGN, 2014)

2.2 Les statistiques anciennes

Un stage de Master (Audinot, 2016) a permis la digitalisation de statistiques anciennes (statistique Daubrée et statistiques agricoles de 1892 et 1929) au niveau de résolution départemental, ainsi qu'une correction d'erreurs de typographie systématique.

Ces statistiques ne reposent formellement sur aucun inventaire à visée statistique, mais résultent d'enquêtes de terrain (Daubrée), ou de commission départementales associées au cadastre (statistiques agricoles) et offrent une information bien moins riche que les données de l'IFN. On n'a que peu d'informations sur la façon dont ont été récoltées les données, les protocoles – s'ils ont existé – n'étant pas associés aux résultats.

2.2.1 La statistique Daubrée

Après des prémices (par exemple enquête Mathieu, 1878 ; Rousseau, 1990), la statistique Daubrée est la première statistique à visée systématique (forêts privées incluses) se consacrant à la forêt française métropolitaine et réalisant un inventaire à la fois des forêts publiques et privées. Elle a été publiée en 1912 par Lucien Daubrée mais se base sur des statistiques de

1908. Elle renseigne à l'origine sur les surfaces forestières par canton administratif, classe de propriété (domaniale, communale soumise, communale non soumise et privée), mode de gestion (taillis, taillis-sous-futaie en conversion, taillis sous-futaie et futaie) et essence. Cependant, les différentes partitions, correspondant à ces facteurs de stratification, ne sont pas toutes emboîtées et aucune information n'est donnée, par exemple sur la part des essences au sein de chaque type de structure (**Figure 2.5**).

Les essences sont décrites selon une échelle en 1/10^e de surface. Seuls les chênes (chêne rouvre, chêne liège, chêne vert et chêne yeuse), le hêtre, le charme et le châtaignier sont décrits chez les feuillus et le sapin, l'épicéa, les pins (pin d'Alep, pin sylvestre, pin maritime, pin laricio et pin à crochets) et le mélèze chez les résineux. Les autres essences sont regroupées sous les termes « feuillus divers » et « résineux divers ». Aucune information n'est disponible sur la façon dont ont été relevées les surfaces associées à ces essences.

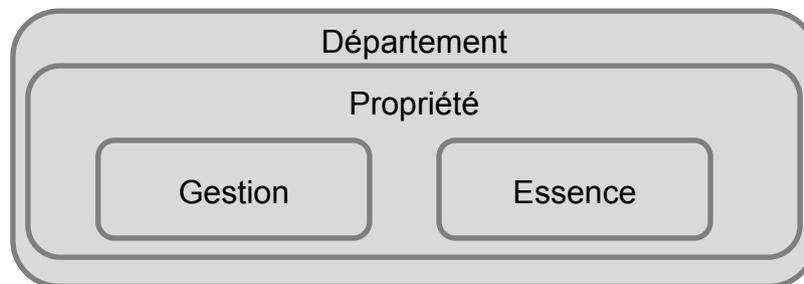


Figure 2.5. Structure de la statistique Daubrée au grain départemental

Du fait de l'annexion de l'Alsace-Moselle en 1870, aucune information française n'est disponible pour les départements du Bas-Rhin, Haut-Rhin et Moselle qui représentent actuellement 3% de la surface forestière française, pour environ 500 000 ha. Les données de l'enquête Daubrée ont donc été complétées par celles de la statistique allemande de 1908 (Ministerium Für Elsaß-Lothringen, 1909), qui coïncide donc avec celle de 1908. Cependant, cette dernière ne propose de ventilation, ni par composition en essence, ni par structure de peuplement.

Il a été choisi d'inclure les surfaces dites « improductives » de la statistique Daubrée (représentant 5% de la surface forestière totale) dans les surfaces forestières pour plusieurs raisons : i) elles entrent dans le calcul du taux de boisement de la statistique, ii) elles sont de plus hors du calcul de la production à l'hectare, ce qui suggère que le terme « improductif » est à prendre au sens littéral (cas emblématique des « boisements » RTM) ; iii) lorsque ces surfaces sont intégrées à la surface forestière, la continuité entre la statistique Daubrée et les statistiques agricoles de 1982 et 1929 est meilleure (Bontemps, 2016).

2.2.2 Les statistiques agricoles décennales de 1892 et 1929

L'objectif des statistiques agricoles est de caractériser l'utilisation des terres agricoles de France. La forêt n'y représente donc qu'une place marginale. Cependant, dans la mesure où la description de l'usage des terres est exhaustive, l'impératif d'un bilan fermé peut contraindre les erreurs. Les statistiques de 1892 et 1929 ont été utilisées car elles permettent d'encadrer la statistique Daubrée et ainsi de pouvoir vérifier la cohérence de ses résultats et connaître la dynamique des surfaces au début du XX^{ème} siècle.

Ces enquêtes apportent par ailleurs une information sur la surface forestière par département, type de propriété et mode de gestion, tous les facteurs étant croisés. Contrairement à la statistique de 1892, la statistique de 1929 ne distingue pas, à l'intérieur des terres soumises au régime forestier, les forêts domaniales des autres forêts soumises.

Du fait de l'annexion de l'Alsace-Moselle, les données de 1892 ont été complétées par celles de Hüffel (1920) qui décrivent les surfaces forestières par types de propriété et département à ces dates.

2.3 Homogénéisation des données

Un travail d'homogénéisation des départements administratifs des statistiques anciennes et des départements administratifs actuels ainsi que des regroupements opérés dans l'opération d'inventaire forestier a dû être effectué (Audinot, 2016). Les départements de Paris (75), des Hauts-de-Seine (92), de Seine-Saint-Denis (93) et du Val-de-Marne (94), anciennement regroupés sous un même département (la Seine) ont été regroupés avec les départements des Yvelines (78), de l'Essonne (91) et du Val-d'Oise (95), anciennement Seine-et-Oise, pour ne former qu'une unité départementale correspondant à celle utilisée par l'IFN.

Dans les statistiques anciennes, Corse-du-Sud (2A) et Haute-Corse (2B) sont regroupés sous un seul et même département.

Les types de propriété identifiés par les différentes statistiques diffèrent aussi (**Tableau 2.3**). Il a été choisi de travailler avec les catégories de propriété et de soumission au régime forestier codés par l'IFN dans la mesure du possible. Cela n'a pas été possible avec les données de la statistique agricole de 1929 qui ont alors été seulement séparées selon les modalités de « forêt soumise » (rassemblant à la fois les forêts domaniales et les autres forêts publiques soumises) et « non-soumis ». Enfin, une homogénéisation des modes de gestion a également été effectuée. Il a été choisi de ne travailler qu'avec trois types : futaie, taillis et taillis-sous-futaie (TSF ; **Tableau 2.4**). Il a été choisi d'attribuer les taillis en conversion (ou TSF en conversion) aux TSF.

Certaines sections sont spécifiques à chacune des statistiques. La statistique de 1892 décrit des « périmètres décrétés et dunes littorales non productifs », la statistique Daubrée des « surfaces improductives » et celle de 1929 des surfaces « récemment plantées ». Ces deux dernières semblent correspondre à des surfaces forestières très peu denses. Les périmètres

décrétés correspondent aux périmètres RTM. L'ensemble de ces périmètres ne sont pas encore forcément boisés. Une estimation de la part boisée est donc nécessaire pour reconstituer la surface forestière totale.

En comparant les résultats globaux des trois statistiques anciennes (**Tableau 2.5**), on remarque la faible surface des taillis des forêts non soumises dans la statistique Daubrée. Il serait possible que la surface des taillis ait été sous-estimée. Une politique de conversion est lancée depuis 1830 et le processus de conversion est très lent. Il se peut que l'estimation de la surface exacte en conversion ou convertie soit difficile à estimer.

Types de propriété					
Statistique agricole de 1892	Soumis domanial	Soumis des communes et établissements publics	Non soumis des particuliers	Non soumis des départements, communes et établissements publics	
Statistique Daubrée	Soumis domanial	Soumis des communes et établissements publics	Non soumis des particuliers	Non soumis des départements, communes et établissements publics	
Statistique agricole de 1929		Soumis	Non soumis des particuliers	Non soumis des communes	Non soumis des sociétés commerciales et civiles
IFN	Domanial	Communal	Non soumis des particuliers		

Tableau 2.3. Correspondance entre les types de propriété identifiés dans les différentes sources de données

Régimes forestiers identifiés					
Statistique agricole de 1892	Taillis simple	Taillis-sous-futaie en conversion	Taillis-sous-futaie	Futaie	
Statistique Daubrée	Taillis simple	Taillis-sous-futaie en conversion	Taillis-sous-futaie	Futaie	
Statistique agricole de 1929	Taillis simple	Taillis-sous-futaie		Futaie	
IFN	Taillis	Mélange futaie et taillis		Futaie régulière	Futaie irrégulière
homogénéisation	Taillis	Taillis-sous-futaie		Futaie	

Tableau 2.4. Correspondance entre les régimes forestiers identifiés dans les différentes sources de données et leur homogénéisation

2 – Présentation des données

Type de propriété	Surfaces forestières 1892 (x10 ³ ha)					Surfaces forestières 1908 (x10 ³ ha)					Surfaces forestières 1929 (x10 ³ ha)			
	Taillis	TSF	Taillis en conversion	Futaie	Périmètres décrétés et dunes littorales non productifs	Taillis	TSF	Taillis en conversion	Futaie	Surfaces improductives	Taillis	TSF	Futaie	Récemment planté
Domanial	25	260	150	460	200	25	310	100	620	150				
Soumis Autres forêts publiques soumises	270	980	20	575	70	260	1000	15	600	80	370	1370	1585	150
Non soumis	3210	1480	0	1790	0	2050	2390	45	1980	280	2840	1900	2315	145

Tableau 2.5. Principaux résultats des statistiques agricoles de 1892 et 1929 et de la statistique Daubrée décrivant les forêts en 1908.

3 Travaux préliminaires sur les données

3.1 Rattachement des départements aux GRECO

Les départements, qui sont des unités administratives, ne représentent pas la complexité écologique du territoire et sont trop nombreux pour permettre une bonne lisibilité des résultats. L'IFN a mis en place des sylvoécorégions (SER) et des Grandes Régions ECOlogiques (GRECO ; **Figure 2.6 et Tableau 2.6**) qui proviennent d'une étude présentée officiellement en 2011 (IFN, 2011a). Elles constituent à la fois un cadre bioclimatique et écologique. Les SER sont construites pour être plus homogènes d'un point de vue environnemental que les départements mais leur nombre, est quasiment égal à celui des départements (86), ne permettant pas une analyse facile des résultats. Ce problème est d'autant plus important que nous souhaitons étudier l'expansion forestière à l'intérieur de ces zones géographiques, par type de propriété et de composition, ce qui multiplie grandement le nombre de strates étudiées. Nous avons donc choisi de travailler avec les GRECO.

On peut remarquer, parmi les 11 GRECO, une différenciation, très utile et informative, entre montagnes (Vosges, Jura, Massif Central, Alpes et Pyrénées) et plaines. De plus, les plaines identifiées permettent de différencier les zones océaniques des zones continentales mais aussi de séparer le Nord du Sud de la France.

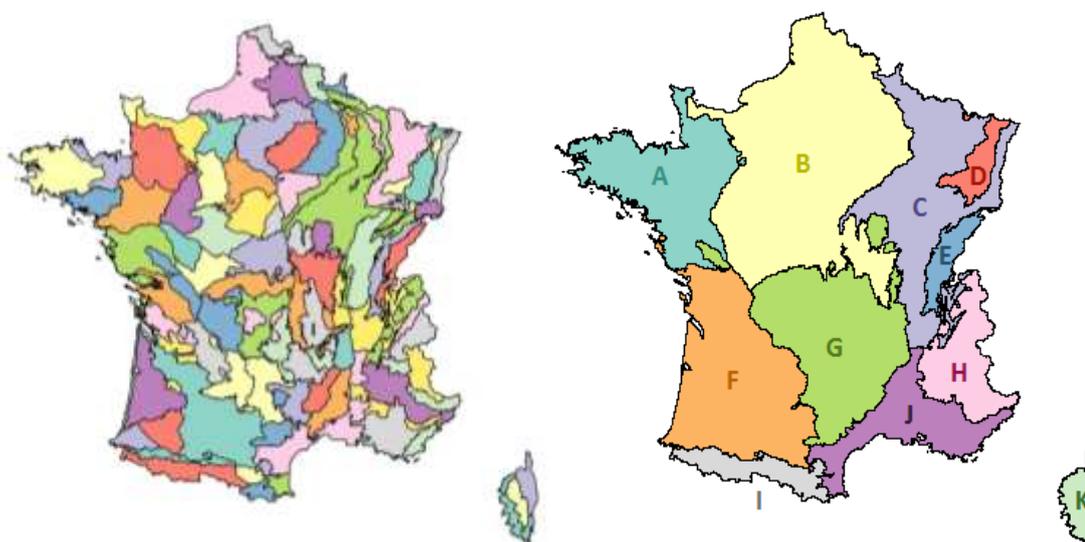


Figure 2.6. Localisation des sylvoécorégions (SER ; à gauche) et Grandes Régions ECOlogiques (GRECO ; à droite)

Code de la GRECO	Nom de la GRECO	Abréviation utilisée
A	Grand Ouest cristallin et océanique	GO
B	Centre Nord semi-océanique	CN
C	Grand Est semi-continentale	GE
D	Vosges	Vo
E	Jura	Ju
F	Sud-Ouest océanique	SO
G	Massif Central	MC
H	Alpes	Al
I	Pyrénées	Py
J	Méditerranée	Me
K	Corse	Co

Tableau 2.6. Grandes Régions ECOlogiques de l'IFN et abréviations utilisées

Cependant, les données IFN ancienne méthode sont des données départementales et, la limite des GRECO ne correspondant pas à celle des départements (**Figure 2.7**), elles ne permettent pas l'analyse de ces données par GRECO. Une étude ayant pour but d'associer à chaque département une seule GRECO a donc dû être effectuée.



Figure 2.7. Correspondance entre les GRECO et les départements

Pour cela, une surface forestière moyenne entre 2005 et 2014 par département et par GRECO a été calculée. A partir de cette surface, la part de la surface forestière de chaque département par GRECO a été calculée (**Figure 2.8**).

Ainsi, pour chaque département, si au moins 60% de sa surface forestière ne se trouvait que dans une seule et même GRECO alors ce département a été associé à cette GRECO (**Figure 2.8**). Cependant, pour 11 départements, il n'était pas possible de trouver une GRECO répondant à ces critères (**Figure 2.9**). Les compositions en essences les plus représentées dans les forêts de ces départements ont donc été étudiées et comparées à celles des GRECO et chacun de ces départements a été associé à la GRECO présentant le plus de similitude.

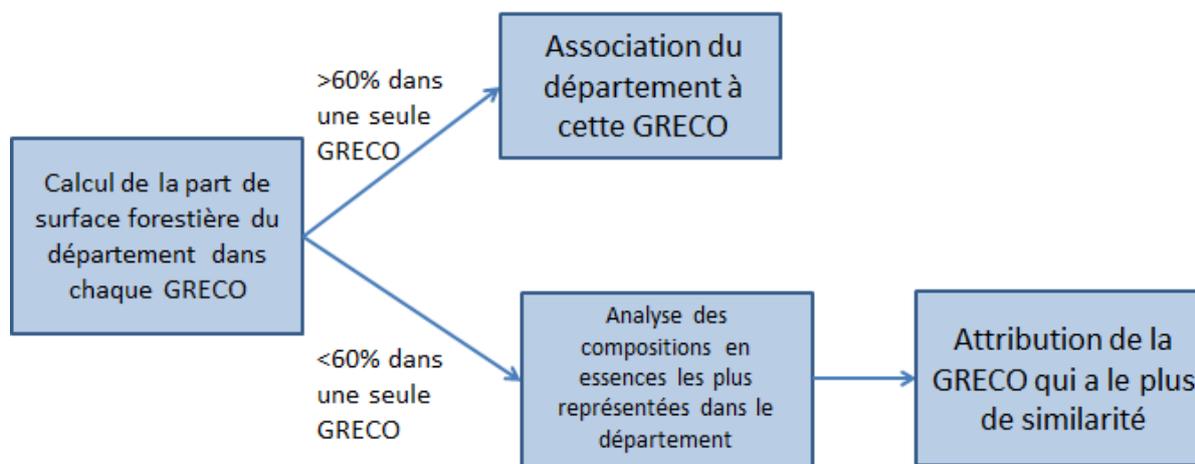


Figure 2.8. Schéma de la démarche pour l'association des GRECO aux départements

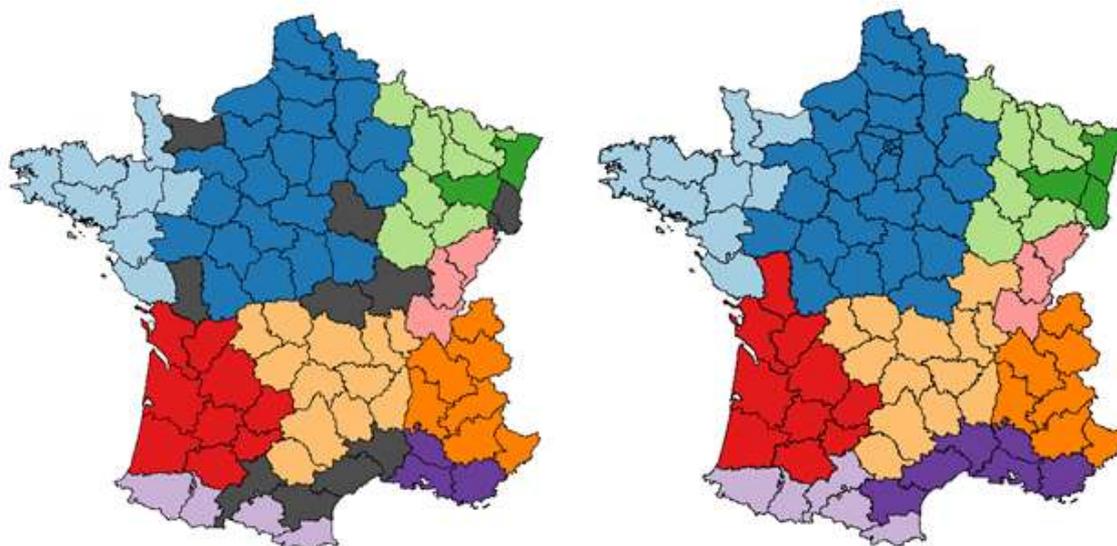


Figure 2.9. Extension des Grandes Régions ECOlogiques (GRECO) de l’Inventaire Forestier National à certains de leurs départements limitrophes. A gauche : les départements par GRECO avec en gris les 11 départements nécessitant une étude de leur composition. A droite : la correspondance finale.

3.2 Etude du changement de surface entre ancienne et nouvelle méthode de l’IFN

3.2.1 Objectif

Lors du passage de l’ancienne méthode à la nouvelle méthode, le changement de définition de la forêt a engendré une augmentation de la valeur de la surface forestière. En effet, l’adoption de la définition internationale de la forêt (FAO, 2004) a entraîné une diminution des seuils de détection de surface forestière (hauteur des arbres, surface minimum ; voir 2.1.2). Cette augmentation devrait être visible dans tous les départements mais peut-être pas de façon homogène.

Afin d’utiliser à bon escient les données de l’IFN, il est important de bien comprendre l’impact du changement de méthode sur les résultats. Le but de l’analyse présentée ici est de comprendre et quantifier ce décalage.

3.2.2 Méthode

La forêt étant en expansion, l’étude ne peut se faire par comparaison des surfaces avant et après 2005. Il a donc été décidé de travailler avec les vitesses d’expansion. L’étude se focalise sur deux périodes :

- La période 1, entre l’avant dernier et le dernier inventaire AM
- La période 2, entre le dernier inventaire AM et la moyenne des résultats NM de 2007 à 2012 (année de référence : 2009,5).

Sur une petite période de temps, les vitesses sont présumées constantes. Une augmentation ou une diminution de celles-ci correspondrait alors à l'effet du changement de méthode.

La valeur de la surface forestière départementale sur ces périodes a été calculée en prenant en compte uniquement la forêt de production hors peupleraies.

Tout d'abord, pour chaque période et chaque département, une vitesse d'expansion V_i ($i = 1$ ou 2) a été calculée.

$$V_i = \Delta S_i / \Delta T_i \quad (1)$$

Où ΔS_i est la variation de surface au cours de la période i et ΔT_i est la durée de la période i . Ensuite, la différence, A , de ces vitesses a été calculée :

$$A = V_2 - V_1 \quad (2)$$

Les moyennes des vitesses V_1 et V_2 ont été comparées à l'aide d'un test t de Student apparié.

3.2.3 Résultats

Les résultats du test de Student montrent qu'il y a une différence de moyenne entre les valeurs des vitesses de la période 1 et celles de la période 2 ($p = 0,01$). La moyenne des différences entre les deux vitesses étant de +370 ha/an ce qui correspond pour la France entière à une augmentation de 33 000 ha/an ou, pour une moyenne de 12ans par période, 397 000 ha. Cependant, les valeurs s'étendent très largement de part et d'autre de cette moyenne (**Figure 2.10**) allant de +4329 ha/an pour la Haute-Corse à -2083 ha/an pour la Dordogne.

On peut s'étonner de l'existence de différences négatives dans un contexte de changement de méthode qui est censé impliquer des différences de sens contraire.

Les variations positives et négatives sont distribuées sur toute la France. Cependant, on remarque que les plus fortes augmentations se trouvent plutôt dans la moitié Est de la France et les fortes variations négatives dans la moitié Ouest (**Figure 2.11**). Les augmentations observées dans le l'Est peuvent correspondre à la fois à une augmentation des accrus naturels dans cette zone privilégiée de la déprise agricole (Chakir et Madignier, 2006) mais aussi à une prise en compte des forêts basses (dont la hauteur est comprise entre 5 et 7 m), très présentes dans cette partie du territoire.

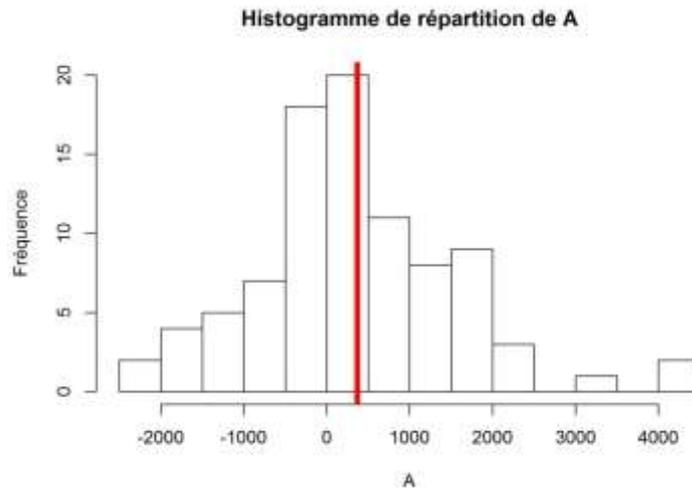


Figure 2.10. répartition des valeurs de A. La ligne rouge représente la moyenne de ces différences.

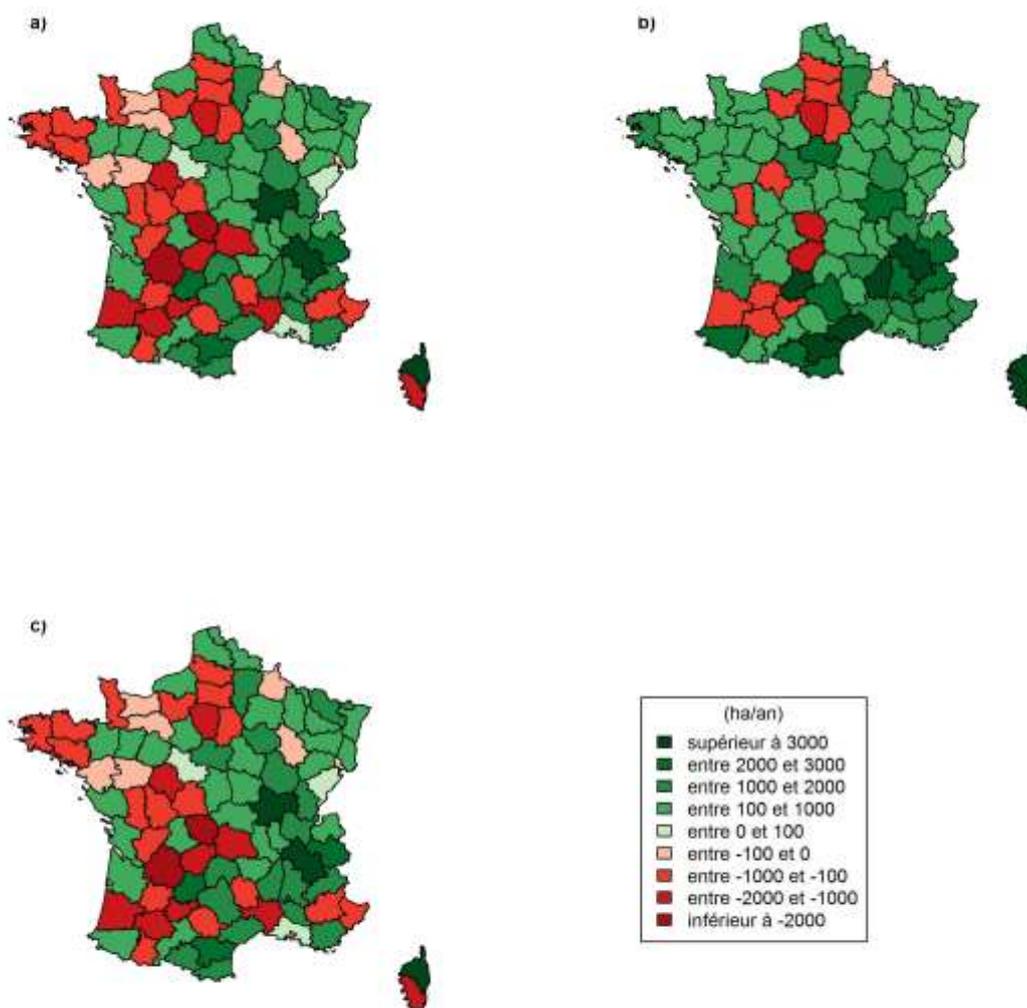


Figure 2.11. cartes de la distribution des changements annuels de surfaces sur la période 1 (V_1 ; a) et la période 2 (V_2 ; b) ainsi que la différence entre les deux (A ; c) par département

3.2.4 Conclusion

La différence observée est importante et n'est pas distribuée de façon homogène sur le territoire. Contrairement à nos attentes, de nombreux départements présentent une diminution de vitesse. Ces diminutions restent, pour l'instant, inexplicables. **Par prudence, il a donc été décidé de ne pas étudier les changements de vitesse de l'expansion en surface entre les deux méthodes dans nos différentes analyses.**

III - Caractérisation de l'expansion des forêts françaises

1 Introduction

L'expansion en surface et en stock des forêts françaises présente des hétérogénéités au niveau spatial, au niveau du type de propriété et de la composition en essences (Pignard, 2000). Alors que la géographie des changements fait écho à l'utilisation des sols (abandon des terres agricoles, boisements du FFN dans le Massif Central, *etc.*), une hétérogénéité structurée par type de propriété semble plutôt liée à des différences de gestion (par exemple, faible intensité de gestion des petites propriétés privées) et le type de composition renvoie, par exemple, aux campagnes de boisement, surtout résineuses (par exemple : FFN et RTM).

Dans ce chapitre descriptif, nous étudions ces changements, leur géographie, leur variation dans le temps et leur dynamique. Ce chapitre présente deux articles écrits lors de cette thèse sur l'étude de ces changements. De plus, deux études complémentaires sont présentées afin d'apporter des précisions :

- i) L'étude de l'effet de l'interpolation des résultats de surface et en stock des inventaires sur la lecture des véritables tendances. Ceci permet de vérifier nos résultats.
- ii) L'étude de l'expansion en fonction de l'altitude. Ne pouvant être effectuée que sur une période très restreinte, cette étude n'a pas été intégrée aux articles mais est présentée ici car elle apporte des précisions sur l'expansion forestière.

Le premier article (Denardou *et al.*, 2017 ; **Annexe III.1**) est un article introductif qui étudie les changements de surface des forêts françaises depuis le début du XX^{ème} siècle et les changements de stock sur pied depuis le début du programme d'inventaire statistique des forêts. Les estimations sont stratifiées selon trois facteurs: la géographie (à travers les départements et les grandes régions écologiques de l'IFN), le type de propriété et la composition en essence.

Le deuxième se focalise seulement sur la période couverte par l'IFN pour étudier plus particulièrement la dynamique des changements observés, à la fois en surface et en stock sur pied mais aussi les changements de densité (stock à l'hectare). Cette étude se base sur une analyse des changements de rythme de variation de ces grandeurs ainsi qu'une exploration de l'effet de certains facteurs forestiers (stock et densité initiales et augmentation récente de surface) sur les changements de stock sur pied à partir de modèles statistiques simples.

2 Article 1

Article 1 : l'expansion séculaire des forêts françaises est dominée par l'accroissement du stock sur pied et ne sature pas dans le temps

Anaïs Denardou, Jean-Christophe Hervé, Jean-Luc Dupouey, Jean Bir, Timothée Audinot, Jean-Daniel Bontemps

Revue Forestière Française, 2017, vol. 69, no 4-5, p. 319-339

Objectifs de l'article

L'objectif de cet article est de poser un premier constat sur l'expansion séculaire des forêts françaises en étudiant à la fois les changements de surface et de stock de bois sur pied.

Matériel et méthodes

Les analyses s'appuient sur 40 ans de données de l'inventaire forestier national sur la forêt de production, et sur la statistique Daubrée (1908) comme horizon séculaire s'agissant des surfaces. Au-delà du constat général, on examine l'hétérogénéité de l'expansion dans l'espace, selon la propriété (forêts domaniales, autres forêts publiques soumises - AFPS - ou forêts privées), et le type de composition ligneuse (feuillus ou résineux).

Résultats principaux

Entre 1908 et 2010, l'augmentation de surface a été de 5,1 millions d'ha (+50%), et a été la plus intense dans le Massif Central. Elle a été deux fois plus forte dans les feuillus que dans les résineux, pour une proportion globale inchangée (>2/3 de feuillus). Entre 1975 et 2010, le stock sur pied (+60%) révèle une évolution plus rapide que la surface (+20%), avec une géographie différenciée : l'évolution des surfaces est cette fois plus marquée dans le sud du pays et la Bretagne, et celle du stock dans le Massif Central, indiquant une certaine continuité avec l'expansion antérieure en surface. Sur la même période, alors que les forêts privées et les AFPS présentent des variations relatives de surfaces similaires (+20%), les premières ont connu une capitalisation largement plus forte de leur stock (+80%, contre +40% pour les AFPS). Entre 1987 et 1994, la forêt privée, plus particulièrement feuillue, présente les plus fortes progressions (+280 000 ha et +105 millions de m³), suivie par la forêt privée résineuse (+60 000 ha et +63 millions de m³). Les évolutions de surface les moins fortes se trouvent dans les forêts résineuses domaniales (+2 000 ha). Les forêts domaniales, en particulier

feuillues, sont stationnaires (+3 millions de m³). Sur la décennie récente (2006-2015), l'augmentation des surfaces et des stocks se maintient, ce qui suggère sa poursuite à moyen terme.

Conclusion

Ces observations montrent que l'expansion forestière concerne essentiellement la forêt privée et soulignent aussi l'ampleur de l'expansion des feuillus, et la capitalisation des anciens boisements résineux en forêt privée. Le caractère plus marqué de l'expansion en stock suggère que la forêt française se situe dans une phase déjà avancée – bien que sans indication de saturation – de la transition forestière.

Article 1 *in extenso*

Voir page suivante.

L'EXPANSION SÉCULAIRE DES FORÊTS FRANÇAISES EST DOMINÉE PAR L'ACCROISSEMENT DU STOCK SUR PIED ET NE SATURE PAS DANS LE TEMPS

ANAÏS DENARDOU^{a,c} – JEAN-CHRISTOPHE HERVÉ^a – JEAN-LUC DUPOUEY^c – JEAN BIR^b –
TIMOTHÉE AUDINOT^a – JEAN-DANIEL BONTEMPS^a

Après avoir connu un phénomène de *transition forestière* (Mather, 1992) dont l'ancienneté est d'ordre séculaire à pluridécennal selon les pays (Meyfroidt et Lambin, 2011), la forêt européenne présente actuellement, au plan mondial, la singularité de connaître à la fois une expansion de sa surface et de son stock sur pied (+ 0,08 %/an pour les surfaces et + 0,40 %/an pour le stock entre 1990 et 2015 ; FAO, 2015). La forêt française présente par ailleurs une des expansions les plus marquées d'Europe (Forest Europe, 2015), avec un accroissement du stock deux fois plus rapide qu'en surface (+ 0,65 %/an en France entre 1990 et 2015 pour les surfaces contre + 1,3 %/an pour le stock, qui atteint actuellement 2 600 millions de m³ ; IGN, 2016). La forêt française pourrait à ce titre devenir assez rapidement le second stock forestier d'Europe, derrière l'Allemagne (> 3 600 millions de m³ ; Forest Europe, 2015) et devant la Suède (actuellement > 2 900 millions de m³ ; Forest Europe, 2015). Parmi les autres pays présentant des singularités de leur expansion, on citera la Turquie (+ 2,3 millions d'ha sur la même période contre + 2,5 millions pour la France), dont la transition forestière est plus récente.

En dépit de ce constat majeur, ces phénomènes d'expansion n'ont été que marginalement étudiés et caractérisés à ce jour (Cinotti, 1996 ; Pignard, 2000), et ne sont pas suffisamment connus du plus grand nombre. Ce constat d'évolution sans précédent de la forêt heurte la notion de gestion durable et de long terme (UNCED, 1992), et suppose un contrôle minimum de la dynamique des ressources forestières. L'expansion actuelle s'opère à un rythme qui indique à l'évidence que cette dynamique est en partie incontrôlée (rôle de l'abandon des terres agricoles, et de la faible ou non gestion dans certains contextes). Ce constat va de pair avec celui que 75 % de la forêt française est privée, et que la notion de plan de gestion n'est obligatoire qu'à partir de 25 ha. Il fait encore singulièrement écho au huitième des « Forestry Principles » de la déclaration de Rio de 1992 (UNCED, 1999), qui suggèrent le rôle favorable que devraient jouer les pays développés dans l'expansion des territoires forestiers (notion de « verdissement global »). Il est à ce titre de premier intérêt d'avoir une meilleure connaissance de ces changements passés de surface et de stock, afin de mieux comprendre les mécanismes qui les dirigent, d'identifier les leviers ou verrous de la mobilisation des ressources associées (par exemple, dans le cadre du plan national Forêt-Bois – PNFB en France ; MAAF, 2016 ; et de la stratégie européenne pour la bioéconomie ; European Commission, 2015), et pouvoir anticiper les évolutions futures de la forêt.

a IGH, Laboratoire d'inventaire forestier (LIF), F-54000 Nancy, France
b IGH, Service de l'inventaire forestier et environnemental, F-45290 Nogent-sur-Vernisson, France
c Université de Lorraine, AgroParisTech, INRA, UMR Silva, F-54000, Nancy, France

ANAIS DENARDOU · JEAN-CHRISTOPHE HERVÉ · JEAN-LUC DUPOUEY ET AL.

Les programmes nationaux d'inventaire statistique des ressources forestières, dont les premiers ont été mis en place en Scandinavie dans les années 1920 (Tomppo *et al.*, 2010), sont l'outil fondamental de caractérisation de ces dynamiques forestières à grande échelle (Tomppo *et al.*, 2010 ; Gschwantner *et al.*, 2016). Les données collectées par le programme de l'inventaire forestier national (IFN), créé par ordonnance du Général de Gaulle en 1958 puis initié en 1961, permettent ainsi de suivre ces évolutions de surface et de stock sur pied depuis cette époque, et de les analyser selon des facteurs fondamentaux de stratification de la forêt documentés par ce même inventaire. Antérieurement à l'inventaire, il existe des statistiques ponctuelles, agricoles et forestières, qui permettent d'étendre la portée temporelle des explorations, bien qu'elles ne documentent que les surfaces. L'adjonction des données de la statistique Daubrée (1912, conduite en 1908), qui a fait l'objet d'explorations approfondies et dont le centenaire a été célébré récemment (professionnels.ign.fr/centenaire-Daubrée-2012) rend ainsi possible l'étude des variations de surface de la forêt sur un siècle, et leur ventilation dans des catégories de propriété et de composition.

Cet article vise à présenter un premier état des lieux de l'expansion forestière française, objet d'un programme de recherche récemment amorcé au Laboratoire d'inventaire forestier de l'IGN. Au-delà des éléments quantitatifs établis à l'échelle nationale, l'objectif est de mettre en exergue les hétérogénéités de ces expansions en surface et en stock. Ces hétérogénéités ont été étudiées selon la propriété foncière et la composition des peuplements, afin d'approcher les processus de l'expansion (politiques de boisement, accrus naturels...), et dans leurs dimensions spatiales et temporelles.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Données source

L'étude s'appuie principalement sur les données de l'inventaire forestier national relatives à la forêt de production hors peupleraies (forêt où rien n'empêche l'exploitation du bois, qui à ce titre n'ont pas « essentiellement une fonction de protection ou d'agrément », IFN, 1985), et où l'inventaire de terrain est réalisé. Elle représente, en 2010, 94 % de la surface forestière totale. Cet inventaire a été mené depuis son origine par département administratif, de façon désynchronisée et à une périodicité voisine de la décennie (« ancienne méthode » d'inventaire, AM ; IFN, 1985), puis a été remplacé en 2005 par une méthode de sondage permettant de couvrir tout le territoire chaque année mais avec une intensité moindre (« nouvelle méthode » d'inventaire, NM ; Hervé *et al.*, 2014). À l'origine de l'inventaire forestier, était considérée comme « formation boisée » toute formation végétale occupant une superficie d'au moins 5 ares « dont la largeur moyenne en cimes est d'au moins 15 mètres » et étant soit « constituée de tiges recensables (diamètre à 1,30 m égal ou supérieur à 7,5 cm) dont le couvert apparent (projection de leurs couronnes sur le sol) est d'au moins 10 % de la surface du sol » soit présentant « une densité à l'hectare d'au moins 500 jeunes tiges non recensables (plants, rejets, semis) vigoureuses, bien conformées et bien réparties » (IFN, 1985). À l'intérieur de ces formations, une différence est faite entre forêt et bosquets. La première a une surface supérieure à 50 ares et une largeur moyenne en cimes supérieure à 25 m. Les seconds ont une surface comprise entre 5 et 50 ares et une largeur moyenne en cimes supérieure à 15 m, et ne présentent pas de limite de surface quand leur largeur ne dépasse pas 25 m. Lors du passage à la nouvelle méthode, l'IFN a adopté la définition internationale de la forêt définie par la FAO (FAO, 2000) comme étant un « territoire couvert à plus de 10 % par des arbres (végétaux ligneux capables d'atteindre au moins 5 mètres à maturité in situ), d'une superficie d'au moins 50 ares et de plus de 20 mètres de large » (IFN, 2008). À ce titre, les bosquets (surface comprise entre 5 et 50 ares) ne font plus partie de la forêt.

Le volume étudié correspond au volume « bois fort » de la tige, c'est-à-dire au volume de la tige depuis le sol jusqu'à une découpe de 7 cm des arbres recensables.

Afin d'étendre au maximum la période d'étude, une base de données ancienne relative aux premiers cycles de l'inventaire forestier et remontant jusqu'en 1971 a été mobilisée, ainsi que des tableaux de résultats départementaux standards depuis l'origine (1961).

S'agissant de la nouvelle méthode d'inventaire, neuf fractions annuelles (2006-2014) ont été agrégées pour définir un point moyen, selon un principe couramment appliqué à l'inventaire forestier pour réduire l'erreur statistique associée aux estimations. Son année de référence est 2010.

La statistique « Daubrée » (1912) a été mobilisée afin d'analyser l'expansion forestière sur une période séculaire. Elle a fait l'objet d'un travail de digitalisation et de correction d'erreurs de typographie systématique, ainsi que d'une interprétation de la signification des différents compartiments par intercomparaison à d'autres statistiques (statistiques agricoles de 1892 et 1929 ; Audinot, 2016). Au contraire de l'inventaire forestier moderne, cette statistique ne fournit cependant que des indications de surfaces forestières, au grain des départements et des cantons administratifs, et en proposant des ventilations selon la propriété foncière et la soumission au régime forestier, et selon les principales essences ou groupes d'essences (en dixièmes de la surface). Aucune définition de la surface n'est explicitée. Nous avons conservé les surfaces dites « improductives » de la statistique dans les surfaces forestières, qui entrent dans le calcul des taux de boisement qui y sont présentés, et incluent explicitement les séries de reboisement dans certains départements. L'Alsace et la Moselle (qui représentent actuellement 3 % de la surface forestière française, pour environ 500 000 ha), étant annexées à cette date, n'ont pas fait l'objet d'une description dans cette enquête, complétée par la statistique allemande de 1908 (Ministerium für Elsaß-Lothringen, 1909), qui lui est donc concomitante. Cette dernière ne proposant pas de ventilation par composition en essences, les proportions de feuillus et de résineux relatives aux départements des Vosges et de Meurthe-et-Moselle de la statistique Daubrée ont été appliquées à cet ensemble. Enfin, une homogénéisation des périmètres départementaux (regroupements historiques ou utilisés par l'IFN) ainsi que des essences ont été conduites (correspondance entre les noms de la statistique Daubrée et ceux de l'IFN — ex : Chêne yeuse et Chêne vert ; Audinot, 2016).

Facteurs étudiés

Les surfaces et les stocks ont été ventilés par département, propriété et classe de composition (feuillus/résineux, définie comme la composition majoritaire sur les points d'inventaire, les surfaces mixtes de la statistique Daubrée ont été réattribuées pour moitié aux résineux et pour moitié aux feuillus). Les modalités de propriété foncière et de soumission au régime ont été regroupées en trois catégories : les forêts domaniales (incluant les récentes forêts « territoriales » de Corse pour les inventaires les plus récents), les autres forêts publiques soumises au régime forestier incluant les forêts communales (autre forêt publique soumise, AFPS), les forêts privées ainsi que les forêts publiques non soumises, regroupées par l'inventaire forestier sous le terme de « forêt privée ». Au moment de l'enquête Daubrée, les forêts communales non soumises représentaient une part significative des forêts communales (12 %, hors Alsace et Moselle ; Daubrée, 1912). Elles ont été regroupées, comme dans la classification actuelle, dans la catégorie des forêts « privées ».

Les données de l'IFN, au contraire des données de la statistique Daubrée, présentent également des surfaces forestières pour lesquelles la composition n'est pas décrite, qui représentent actuellement 8 % de la surface forestière totale (> 1 million d'hectares) et 0,2 % du stock sur pied. Elles correspondent à des peuplements dont le couvert absolu de la strate recensable est inférieur à 10 % avant 2005 et inférieur à 15 % depuis. L'évolution de la proportion des compositions a donc été conduite en écartant ces surfaces du calcul.

III - Caractérisation de l'expansion des forêts françaises

ANNAIS DENARDOU - JEAN-CHRISTOPHE HERVÉ - JEAN-LUC DUPOUEY ET AL.

La stratification synoptique par département des surfaces selon la composition dans les forêts soumises (c'est-à-dire domaniales et AFPS) et non soumises (« privées » au sens IFN) de la statistique Daubrée a permis d'analyser les évolutions de surface des forêts feuillues et résineuses dans ces deux grandes catégories de propriété.

Pour une meilleure lisibilité des résultats, et parce que les coordonnées des placettes ne sont pas disponibles pour les cycles les plus anciens, les départements ont été regroupés pour épouser au plus près les grandes régions écologiques (GRECO) de l'IFN (IFN, 2011 ; tableau I, ci-dessous), en suivant un principe d'affectation à la GRECO dans laquelle la surface forestière du département était supérieure à 60 % en cas de chevauchement, et en analysant plus finement leur composition quand ce critère ne suffisait pas (l'analyse de la composition a été effectuée par comparaison des compositions en essences majoritaires dans le département avec celles des GRECO chevauchantes).

TABLEAU I Correspondance entre les grandes régions écologiques (GRECO) et les départements

GRECO	Départements
Grand Ouest cristallin et océanique	14, 22, 29, 35, 44, 50, 53, 56, 85
Centre Nord semi-océanique	02, 03, 10, 18, 27, 28, 36, 37, 41, 45, 49, 51, 58, 59, 60, 61, 62, 72, 75, 76, 77, 78, 80, 86, 89, 91, 92, 93, 94, 95
Grand Est semi-continentale	08, 21, 52, 54, 55, 57, 70, 90
Vosges	67, 68, 88
Jura	01, 25, 39
Sud-Ouest océanique	16, 17, 24, 32, 33, 40, 46, 47, 79, 82
Massif central	07, 12, 15, 19, 23, 42, 43, 48, 63, 69, 71, 81, 87
Alpes	04, 05, 06, 26, 38, 73, 74
Pyrénées	09, 31, 64, 65, 66
Méditerranée	11, 13, 30, 34, 83, 84
Corse	2A, 2B

Afin de mesurer l'intensité de l'expansion observée dans une strate quelconque de la forêt (et mesurer ainsi l'inégalité d'expansion des forêts selon les strates), des indices « d'intensité d'expansion » en volume de bois en surface forestière (I_V et I_S respectivement) ont été définis comme étant la part de la strate dans l'expansion totale P_e en volume de bois / surface, rapportée à la part initiale que représente cette strate dans l'ensemble de la forêt P_o :

$$I_{S,V} = \frac{P_{eS,V}}{P_{oS,V}}$$

Périodes d'étude

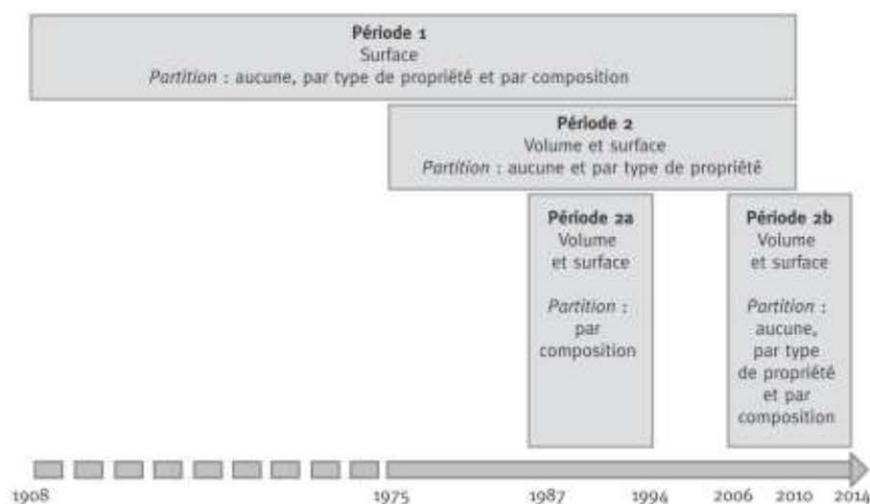
L'évolution séculaire des surfaces forestières entre 1908 et 2010 a pu être étudiée à la fois par type de composition et par type de propriété (période 1 ; figure 1, p. 323).

Les estimations départementales des caractéristiques forestières selon les différentes stratifications de propriété et de composition ont été interpolées linéairement dans le temps à une

résolution annuelle afin de s'affranchir de la désynchronisation entre départements. Une extrapolation vers le passé a été réalisée à partir du premier cycle. Par prudence, l'interpolation commence (et se termine) à des dates où 80 % des départements sont couverts par un premier (respectivement un dernier) inventaire. La période d'étude commence donc en 1975 et se termine en 2010 (période 2).

Les données de composition relatives aux cycles les plus anciens n'étant pas disponibles au moment de l'étude, la période d'étude des changements de composition est donc en effet raccourcie et ne commence qu'en 1987. De plus, la méthode d'évaluation de la composition en essences sur les points d'inventaires a été rendue plus objective et plus précise à la faveur de la mise en place de la nouvelle méthode (Morneau *et al.*, 2008 ; IGN, 2014). Une analyse de la continuité entre les deux méthodes a révélé des ruptures systématiques, interdisant toute analyse d'évolution des compositions sur la période complète de l'inventaire forestier, et en lui préférant une analyse en sous-périodes relatives à chaque méthode d'inventaire. Les périodes étudiées seront 1987-1994 et 2006-2014 (périodes 2a et 2b).

FIGURE 1 PÉRIODES D'ÉTUDE DE LA SURFACE FORESTIÈRE DE PRODUCTION ET DU STOCK SUR PIED (VOLUME) PAR TYPE DE PROPRIÉTÉ ET COMPOSITION



RÉSULTATS

Évolution séculaire de la surface forestière (1908-2010 ; période 1)

- *Analyse globale*

Depuis 1908, la surface forestière française a augmenté de 5,1 millions d'hectares (c'est-à-dire + 50 %), passant de 10,3 (en données corrigées de l'Alsace-Moselle) à 15,4 millions d'hectares (forêt de production hors peupleraie et hors couverts non décrits). Cette augmentation s'est faite

III - Caractérisation de l'expansion des forêts françaises

ANAIS DENARDOU - JEAN-CHRISTOPHE HERVÉ - JEAN-LUC DUPOUEY ET AL.

avec une accélération sur la fin du siècle, puisque la vitesse d'expansion était en moyenne de + 42 000 ha/an jusqu'en 1975, puis de + 66 000 ha/an entre 1975 et 2010. Au grain départemental, tous les départements excepté la Marne (- 45 000 ha) ont vu leur surface forestière augmenter entre 1908 et 2010. Cette expansion n'est cependant pas homogène (figure 2, ci-dessous). Les augmentations de surface ont été plus intenses sur l'ensemble de la GRECO du Massif central avant 1975 (> 40 % de l'expansion totale en surface forestière de la France entre 1908 et 1975 ; $I_5 = 4,6$; tableau II, p. 325). La surface forestière du Massif central a plus que doublé entre 1908 et 1975 (> + 110 %) alors qu'aucune autre GRECO n'a vu sa surface augmenter de plus de 35 % (> + 30 % dans le Jura et le Grand Ouest cristallin et océanique, et > + 20 % en Corse et dans le Sud-Ouest océanique). Depuis, cette progression reste plus intense dans le sud du pays, incluant la région méditerranéenne (20 % de l'expansion en surface entre 1975 et 2010 ; $I_5 = 2,6$) et le Massif central (17 % ; $I_5 = 1,0$). La Corse montre la plus forte progression relative (> + 75 % ; $I_5 = 4,4$), suivie par le Grand Ouest cristallin et océanique et la région méditerranéenne (> + 40 % pour le Grand Ouest cristallin et océanique, $I_5 = 2,5$; > + 50 % pour la région méditerranéenne). L'expansion en surface de la forêt française est donc hétérogène à la fois au plan spatial et temporel.

FIGURE 2 VARIATION ANNUALISÉE DE SURFACE FORESTIÈRE DE PRODUCTION PAR DÉPARTEMENT SUR LES PÉRIODES 1908-1975 ET 1975-2010

La première période est décrite par la statistique Daubrée, la statistique allemande de 1908 et les inventaires forestiers départementaux. La seconde s'appuie sur les données des deux méthodes d'inventaire. En Corse, la non-distinction des deux départements en 1908 ne permet pas d'analyser leur évolution de surface de façon distincte.

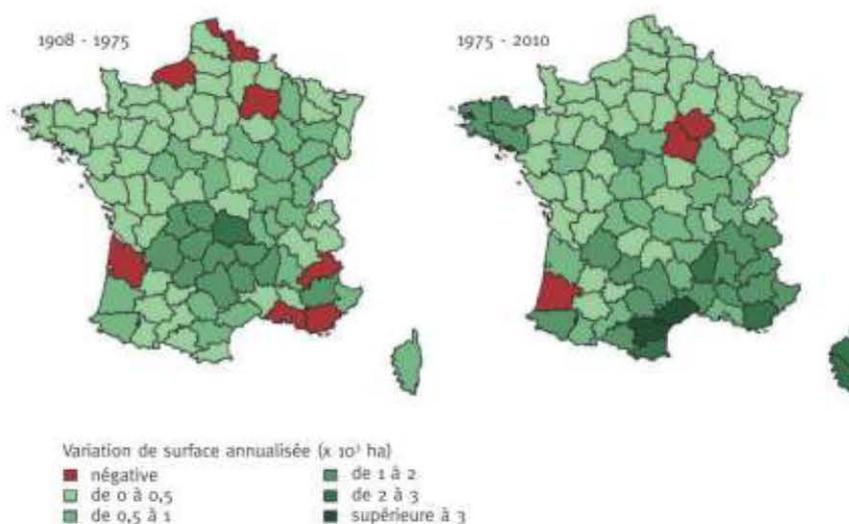


TABLEAU II Variations de surface en forêt de production par grande région écologique (GRECO) sur les périodes 1908-1975 et 1975-2010

I_s et I_v sont les indices d'intensité d'expansion dans les strates, ratios de l'expansion relative de la strate sur la part initiale que représentait cette strate.

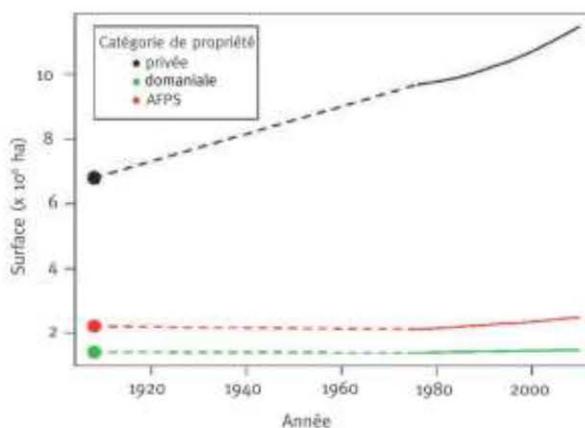
GRECO	1908-1975		1975-2010	
	Variation de surface (x 10 ³ ha)	I_s	Variation de surface (x 10 ³ ha)	I_s
Grand Ouest cristallin et océanique	97,5	1,2	176,4	2,5
Centre Nord semi-océanique	289,9	0,4	268,8	0,6
Grand Est semi-continentale	261,0	0,7	81,2	0,3
Vosges	68,4	0,5	39,8	0,4
Jura	143,6	1,2	51,7	0,5
Sud-Ouest océanique	377,1	0,8	144,2	0,4
Massif central	1 155,7	4,6	377,4	1,0
Alpes	210,8	0,7	326,8	1,4
Pyrénées	129,2	0,8	320,2	2,6
Méditerranée	29,6	0,2	339,8	2,6
Corse	45,1	1,0	168,9	4,4

• Analyse au niveau de la propriété forestière

Une forte hétérogénéité s'observe au sein des catégories de propriété. L'essentiel de l'expansion se cantonne aux forêts privées, avec + 4,7 millions d'ha entre 1908 et 2010 soit 91 % de l'expansion (figure 3, ci-dessous ; $I_s = 1,4$). Leur part dans la surface forestière française est passée de

FIGURE 3 ÉVOLUTION DE LA SURFACE FORESTIÈRE DE PRODUCTION PAR TYPE DE PROPRIÉTÉ ENTRE 1908 ET 2010

Les données de 1908 proviennent de la statistique Daubrée et de la statistique allemande (Alsace-Moselle), et de l'inventaire forestier national pour la période 1975-2010.
AFPS : autres forêts publiques soumises.



III - Caractérisation de l'expansion des forêts françaises

ANAIS DENARDOU - JEAN-CHRISTOPHE HERVÉ - JEAN-LUC DUPOUEY ET AL.

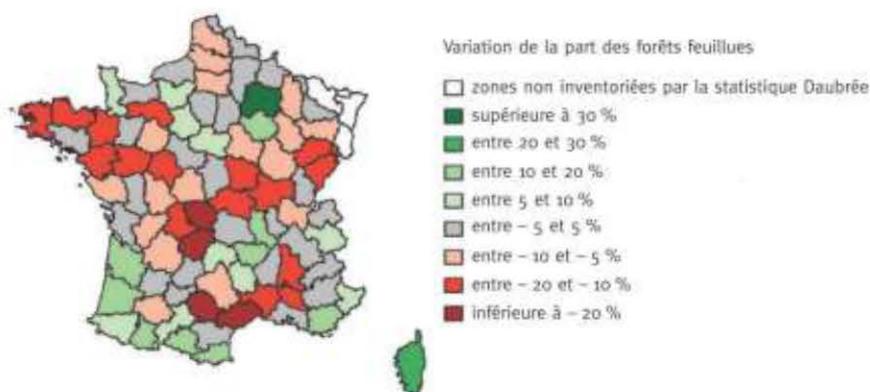
66 % en 1908 à 74 % en 2010. Les forêts domaniales présentent la plus faible augmentation sur cette période (+ 106 000 ha ; $I_5 = 0,2$).

• Analyse au niveau de la composition en essences

Sur la même période, la surface des forêts dont la composition est identifiée a augmenté de 3,9 millions d'ha. Les trois quarts de cette augmentation concernent des surfaces occupées par des essences feuillues (+ 3,0 millions d'ha contre 0,9 million d'ha pour les résineux ; 77 % de l'expansion). Bien que l'enrésinement des forêts françaises ait régulièrement été mis en avant dans le débat public, la progression dominante reste de composition feuillue, avec une composition relative des forêts françaises sur les surfaces identifiées qui n'a pratiquement pas évolué depuis 1908. Alors que les forêts feuillues représentaient 70 % de la forêt française en 1908, ce chiffre était de 68 % en 1987 et atteint 73 % aujourd'hui. Ce même phénomène reste observable au sein des types de propriété soumise et privée (incluant les forêts publiques non soumises). En forêt soumise, les feuillus représentaient en 1908 et représentent toujours actuellement deux tiers de la surface forestière dont la composition est identifiée (trois quarts dans les forêts privées et publiques non soumises). Néanmoins, au niveau des GRECO, on identifie des régions où la part des feuillus a fortement augmenté. C'est le cas, par exemple, du Sud-Ouest océanique où elle est passée de 47 % à 63 %, entre 1908 et 2010, et de la Corse où elle est passée de 52 à 80 %. Le Massif central a vu sa part de forêts feuillues diminuer, passant de 72 à 66 %. Au grain départemental, on remarque quelques ensembles où la part de la surface forestière feuillue par rapport à la surface forestière départementale identifiée a augmenté d'au moins 10 %, incluant le Sud-Ouest du pays (dont les Pyrénées), la Corse, la Champagne, et une partie du Massif central (Loire et Haute-Loire, figure 4, ci-dessous). De façon remarquable, cette proportion a diminué d'au moins 10 % dans des ensembles départementaux situés en Bretagne et dans l'Ouest, dans le Limousin, en Bourgogne (dont le Morvan), en Franche-Comté et sur un arc situé au sud du Massif

FIGURE 4 DIFFÉRENCES DÉPARTEMENTALES DE LA PART DES FORÊTS FEUILLUES DANS LA SURFACE FORESTIÈRE DE PRODUCTION DÉCRITE EN COMPOSITION SUR LA PÉRIODE 1908-2010

Les définitions de la forêt n'étant pas semblables entre 1908 et 2010, une classe de différence « tampon », comprise entre - 5 et 5 %, n'a pas été interprétée (zone grisée). AFPS : autres forêts publiques soumises.



central, allant du Tarn à la Drôme, c'est-à-dire des régions initialement peu forestières, et qui ont été fortement enrésinées, ce qui souligne le caractère d'abord contextuel du débat sur l'enrésinement des forêts.

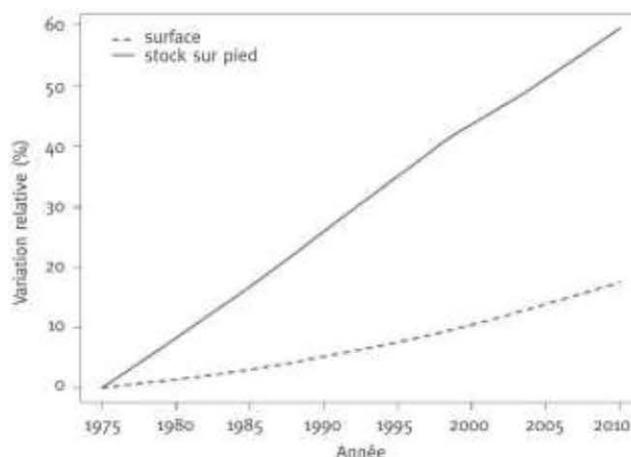
Évolution de la surface et du stock sur pied depuis 1975 (période 2)

• Analyse globale

Entre 1975 et 2010, la surface forestière française a augmenté de 2,3 millions d'ha, ce qui représente une augmentation de 17 %. Sur la même période, le stock sur pied a connu une évolution beaucoup plus rapide avec une augmentation de plus de 59 % (+ 930,0 millions de m³). Depuis 1975 et de façon remarquable, ces expansions ne présentent aucune saturation (figure 5, ci-dessous).

FIGURE 5 VARIATIONS RELATIVES DE SURFACE FORESTIÈRE DE PRODUCTION ET DE STOCK DE BOIS SUR PIED SUR LA PÉRIODE 1975-2010

Les chronologies ont été obtenues par interpolation linéaire départementale concernant l'ancienne méthode d'inventaire.



Au grain départemental, on remarque une hétérogénéité spatiale de l'expansion du stock sur pied, plus intense dans un large centre du pays (figure 6, p. 328). La corrélation interdépartementale calculée sur l'ensemble du territoire entre les variations de surfaces à une période ancienne d'une part (1908-1975) et celles plus récentes du stock sur pied d'autre part (1975-2010) est marquée ($0,5, p < 10^{-6}$), et souligne la contribution différée de l'apparition de nouvelles forêts sur le stock sur pied.

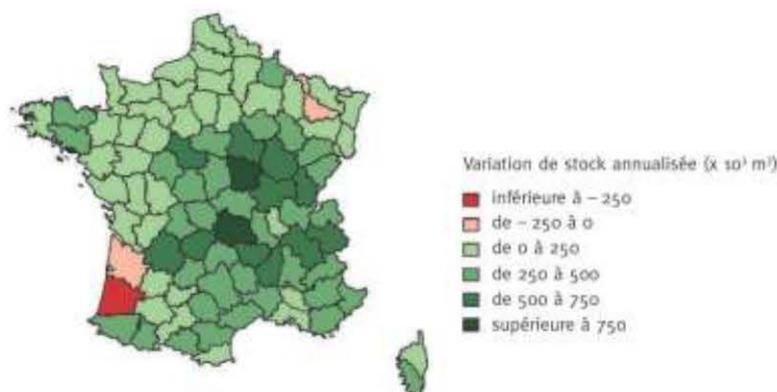
La résolution annuelle de la nouvelle méthode d'inventaire permet encore d'illustrer les tendances très récentes d'expansion de la forêt française (cf. encadré, p. 330). Sur la dernière décennie, la progression des surfaces dépasse les 100 000 ha/an, et celle du stock sur pied les 40 millions de m³ par an, et vient souligner le caractère à la fois spectaculaire et non saturant de cette expansion. Une exploration de l'incertitude associée à l'intensité annuelle de sondage du programme d'inventaire forestier démontre qu'il existe une incertitude significative sur cette expansion, de l'ordre de 50 %.

III - Caractérisation de l'expansion des forêts françaises

ANAIS DENARDOU - JEAN-CHRISTOPHE HERVÉ - JEAN-LUC DUPOUEY ET AL.

FIGURE 6 VARIATION ANNUALISÉE DU STOCK SUR PIED PAR DÉPARTEMENT (1975-2010)

Les trois départements montrant des variations négatives (Meurthe-et-Moselle, Landes et Gironde) font partie de ceux qui ont été fortement impactés par les tempêtes de 1999 et 2009 (Aquitaine).



• *Analyse au niveau de la propriété forestière*

De manière générale, les augmentations absolues de surface et de stock sont essentiellement cantonnées aux forêts privées (+ 1,8 million d'ha et + 790 millions de m³ ; tableau III, ci-dessous).

Tandis qu'une progression significative des surfaces et des stocks est également identifiée en forêt communale, la forêt domaniale est largement stationnaire (tableau III, ci-dessous). L'indice d'intensité d'expansion de la forêt privée est de 1,1 en surface et de 1,3 en stock sur pied. La part des forêts privées dans ces deux quantités tend donc à augmenter sur la période, et plus rapidement en stock sur pied qu'en surface.

Alors que les évolutions relatives des surfaces des forêts privées et communales sont similaires (20 %, tableau III, ci-dessous ; figure 7, p. 329), l'augmentation relative de stock sur pied en forêt privée est deux fois plus forte que celle des AFPS (+ 80 % pour les forêts privées contre + 40 %

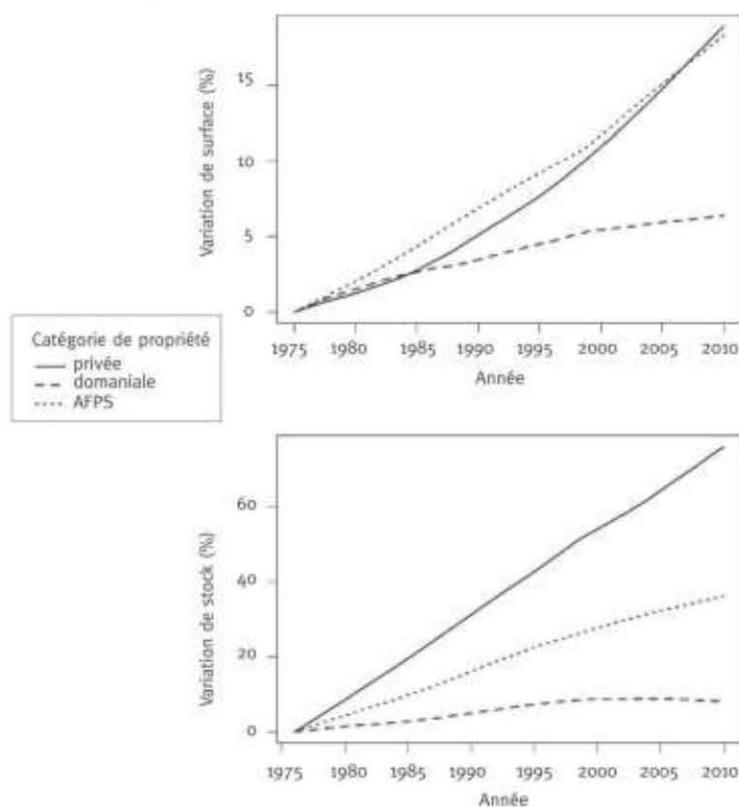
TABLEAU III Variations absolues et relatives de surface et de stock sur pied en forêt de production par catégorie de propriété (1975-2010)

Les surfaces forestières publiques non soumises au régime forestier sont intégrées dans les forêts privées par l'inventaire forestier. AFPS : autres forêts publiques soumises. Les forêts territoriales de Corse ont été incluses dans les forêts domaniales. I_s et I_v sont les indices d'intensité d'expansion dans les strates, ratios de l'expansion relative de la strate sur la part initiale que représentait cette strate.

Catégorie de propriété	Variation de surface			Variation de stock		
	Absolue (x 1 000 ha)	Relative (%)	I_s	Absolue (x 10 ⁶ m ³)	Relative (%)	I_v
Privée	+ 1 800	+ 20	1,1	+ 790	+ 80	1,3
Domaniale	+ 90	+ 6	0,4	+ 20	+ 9	0,1
AFPS	+ 380	+ 20	1,0	+ 120	+ 40	0,6

FIGURE 7 **ÉVOLUTIONS RELATIVES DE LA SURFACE ET DU STOCK SUR PIED DE LA FORÊT DE PRODUCTION PAR TYPE DE PROPRIÉTÉ (1975-2010)**

AFPS : autres forêts publiques soumises. La forêt publique non soumise est incluse par l'Inventaire forestier national dans la forêt « privée ».



pour les AFPS) tandis que le stock reste stable en forêt domaniale, voire a diminué légèrement au cours de la période récente (figure 7, ci-dessus). Quand la forêt privée représentait moins de deux tiers du stock sur pied total (63 %) en 1975, elle en représente en 2010 plus de 70 %.

• *Analyse aux niveaux de la composition en essences et de la propriété (période 2a)*

Entre 1987 et 1994, les forêts privées feuillues ont connu l'expansion absolue la plus importante en surface et en stock sur pied (+ 230 000 ha et + 100 millions de m³; tableau IV, p. 331). Les forêts privées feuillues présentent un indice d'intensité d'expansion en surface de 1,3, traduisant leur importance croissante dans la surface forestière totale. Ce constat n'est partagé qu'avec les AFPS résineuses. Cependant, les forêts privées feuillues et privées résineuses présentent un même ratio de 1,2 pour les stocks.

III - Caractérisation de l'expansion des forêts françaises

ANNAIS DENARDOU - JEAN-CHRISTOPHE HERVÉ - JEAN-LUC DUPOUEY ET AL.

Alors que les forêts privées feuillues présentent une expansion relative de surface plus rapide que les forêts privées résineuses sur la période, elles présentent des variations relatives un peu plus faibles pour les stocks (+ 12,7 % pour les forêts feuillues et + 13,2 % pour les forêts résineuses), traduisant une capitalisation par unité de surface plus forte dans les forêts résineuses.

Après les forêts privées, on remarque que ce sont les AFPS et plus particulièrement les AFPS feuillues qui présentent les plus fortes et plus intenses expansions. Cependant, leur évolution absolue de surface/stock représente respectivement seulement 10 % à 20 % de celle des forêts privées feuillues. Les forêts domaniales ne connaissent quasiment pas d'expansion et présentent les intensités d'expansion les plus faibles ($I \leq 0,6$; tableau IV, p. 331).

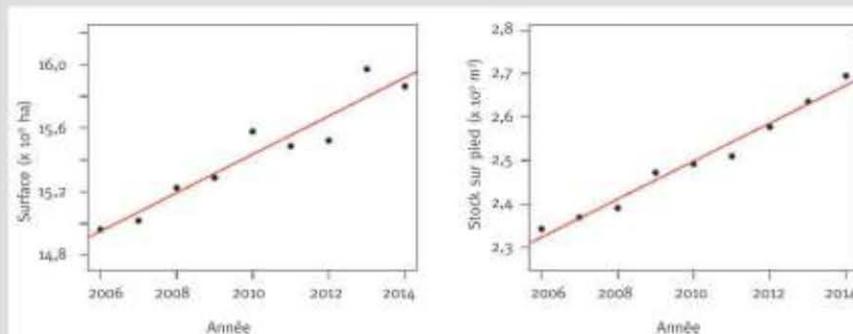
Une exploration effectuée sur la dernière décennie d'inventaire annuel (période 2b) confirme que ce sont à nouveau les forêts privées et feuillues qui dominent l'expansion de surface et de stock (cf. encadré ci-dessous).

Les évolutions récentes de surface forestière et de stock sur pied

Afin de tirer profit de la résolution annuelle de la nouvelle méthode d'inventaire, une analyse par régression a permis d'étudier les tendances d'expansion en surface et en volume des forêts françaises sur la période 2006-2014 (période 2b ; figure A).

FIGURE A ÉVOLUTION DE LA SURFACE ET DU STOCK SUR PIED EN FORÊT DE PRODUCTION ENTRE 2006 ET 2014

Les points correspondent aux estimations annuelles des surfaces et stocks, et sont ajustés par régression linéaire.

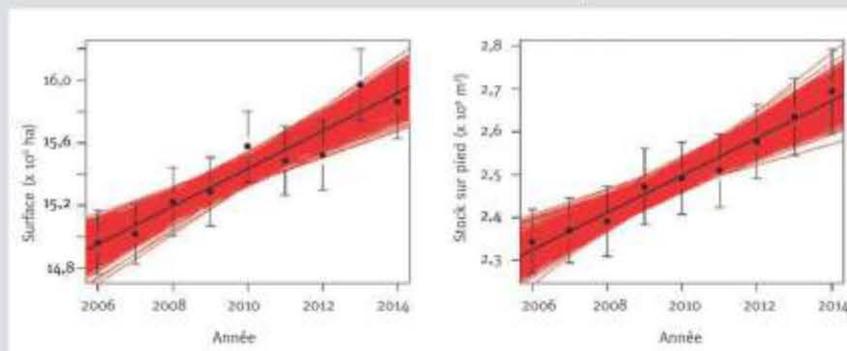


De 2006 à 2014, la surface forestière a ainsi augmenté à rythme moyen de 120 000 ha/an et le stock sur pied de 44 millions de m³/an.

Compte tenu de l'incertitude annuelle, une procédure de ré-échantillonnage dans la distribution des estimateurs annuels (figure B) a été implémentée (1 000 échantillons). Elle permet de situer le niveau d'incertitude de ces tendances. À un niveau de confiance de 95 % (bilatéral), la vitesse d'expansion en surface se situe ainsi entre + 97 000 et + 145 000 ha/an et celle en volume entre + 34 et + 53 millions de m³/an, traduisant une incertitude d'environ 50 % dans chaque cas. De façon remarquable, ces vitesses d'expansion sont plus marquées que celles observées entre 1976 et 2010 (71 000 ha/an et 27 millions de m³/an respectivement).

FIGURE B VARIATIONS DES TENDANCES ANNUELLES D'ÉVOLUTION DE SURFACE ET DU STOCK SUR PIED ENTRE 2006 ET 2014

Les barres d'erreur (noir) représentent l'intervalle de confiance à 95 % des estimations annuelles fournies par le programme d'inventaire forestier. Les droites de régression (rouge) sont obtenues par ajustement sur 1 000 échantillons échantillonnés dans les distributions précédentes.



Des régressions linéaires par propriété et par type de composition ont permis de montrer que les forêts privées et les forêts feuillues présentent toujours les plus fortes augmentations absolues en surface et en stock. Les peuplements résineux présentent une expansion en surface très faible voire une stagnation (+ 7 400 ha/an) sans comparaison avec celle des forêts feuillues (+ 134 000 ha/an). Cette différence est moins importante pour le stock sur pied (+ 29 millions de m³/an pour les forêts feuillues et + 15 millions de m³/an pour les forêts résineuses), soulignant la capitalisation, par unité de surface, plus rapide en forêt résineuse.

TABEAU IV Variations absolues et relatives de surface et de stock sur pied en forêt de production par type de propriété et type de composition (1987-1994)

AFPS : autres forêts publiques soumises. La forêt publique non soumise est incluse par l'inventaire forestier national dans la forêt « privée ». Les forêts territoriales de Corse ont été incluses dans les forêts domaniales. I : voir tableau II (p. 325).

Propriété	Composition	Variation de surface			Variation de stock		
		Absolue (x 10 ³ ha)	Relative (%)	I _S	Absolue (x 10 ⁶ m ³)	Relative (%)	I _V
Privée	Feuillus	+ 230	+ 3,4	1,3	+ 100	+ 12,7	1,2
	Résineux	+ 50	+ 1,6	0,6	+ 60	+ 13,2	1,2
Domaniale	Feuillus	+ 15	+ 1,7	0,6	+ 3	+ 2,1	0,2
	Résineux	+ 2	+ 0,3	0,2	+ 4	+ 4,7	0,4
AFPS	Feuillus	+ 25	+ 1,7	0,7	+ 20	+ 9,2	0,9
	Résineux	+ 24	+ 3,3	1,3	+ 10	+ 7,3	0,7

III - Caractérisation de l'expansion des forêts françaises

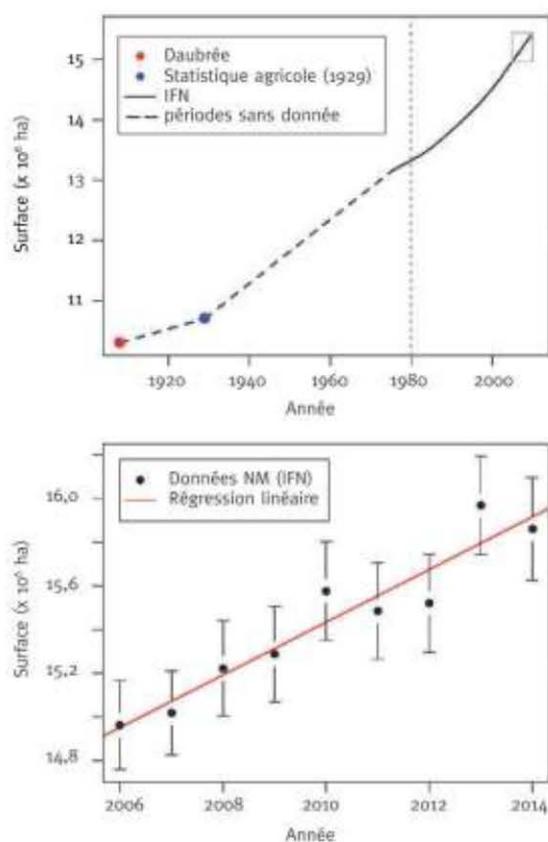
ANAIS DENARDOU - JEAN-CHRISTOPHE HERVÉ - JEAN-LUC DUPOUEY ET AL.

Vision synoptique de l'évolution séculaire des surfaces forestières

Une vision synoptique de l'évolution de la surface forestière métropolitaine peut être construite en combinant les informations apportées par la statistique Daubrée et la statistique allemande sur la surface forestière en 1908, l'interpolation des surfaces forestières départementales entre 1975 et 2010 et, enfin, une régression linéaire appliquée aux inventaires annuels de l'IFN (2006-2014, figure 8, ci-dessous). La surface indiquée par la statistique agricole décennale de 1929 (Audinot, 2016) a également été indiquée afin d'avoir un aperçu de la dynamique d'expansion au début du siècle.

FIGURE 8 ÉVOLUTION DE LA SURFACE FORESTIÈRE FRANÇAISE ENTRE 1908 ET 2014, ÉTABLIE À PARTIR DE LA STATISTIQUE DAUBRÉE, DE CELLE DE 1929 ET DES DEUX PROTOCOLES D'INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL

La ligne verticale en pointillés représente la date à laquelle 100 % des départements possèdent un premier inventaire IFN (1980). NM : nouvelle méthode d'inventaire annualisé des forêts, conduite depuis 2005.



Cette courbe met en avant l'augmentation sans forte fluctuation des surfaces forestières productives, ainsi qu'une tendance très nette à l'accélération. Cette absence remarquable de saturation dans la dynamique séculaire des surfaces suggère un potentiel d'extension encore élevé, et infirme le constat opéré par Cinotti (1996).

DISCUSSION

Cette étude se fonde sur deux sources d'information : le programme national d'inventaire forestier, et la statistique Daubrée. Aucune information n'est donnée dans cette dernière sur la définition de la forêt, ni sur la manière de décrire la composition en essences. Il a été choisi d'inclure les surfaces dites « improductives » de cette statistique dans les forêts pour plusieurs raisons :

- elles entrent dans le calcul du taux de boisement de la statistique ;
- elles sont de plus hors du calcul de la production à l'hectare, ce qui suggère que le terme « improductif » est à prendre au sens littéral (cas emblématique des « boisements » RTM) ;
- lorsque ces surfaces sont intégrées à la surface forestière, la continuité entre la statistique Daubrée et les statistiques agricoles de 1982 et 1929 est plus nette (Bontemps, 2016).

La définition de la forêt utilisée par l'IFN a évolué en 2005 lors du passage de l'ancienne à la nouvelle méthode. Ce changement conduit à une détection des surfaces forestières qui peut être plus sensible, puisqu'aucun critère de recensabilité diamétrique d'arbres n'y intervient. Néanmoins, la largeur minimale de la forêt est passée de 15 à 20 m, et la surface minimale de 5 à 50 ares puisque les bosquets ne sont plus comptabilisés, rendant cet aspect de la définition moins sensible. Afin d'harmoniser au maximum ces définitions, il aurait été possible d'inclure les bosquets dans les données récentes. Cela n'a pas été fait pour deux raisons. Premièrement, compte tenu de la différence de largeur minimale des bosquets, du critère de recensabilité, et de leur extension sans limite de surface quand ils sont moins larges que 25 m, une homogénéisation parfaite entre méthodes d'inventaire reste impossible. Deuxièmement, les bosquets, tels qu'ils sont définis aujourd'hui (d'au moins 40 % de couvert au sol et d'une largeur d'au moins 20 m), ne représentent que 0,8 % de la surface totale comprenant les forêts et les bosquets de production. L'ajout des bosquets dans l'analyse ne peut donc avoir qu'un impact marginal sur les analyses présentées.

La situation est beaucoup plus homogène s'agissant de l'estimation des stocks de bois sur pied en « volume bois fort tige » parce que cette définition n'a pas varié au cours du temps. Si les méthodes de cubage ont évolué depuis la nouvelle méthode, les estimations en ancienne méthode se sont traditionnellement fondées sur des échantillons *ad hoc* et complets pour chaque département, s'apparentant à des « quasi-mesures ». La continuité des estimations a de plus été vérifiée.

Les forêts françaises de production présentent une forte expansion sur toute la période d'étude, les progressions de surface ayant même accéléré depuis 1975. Ainsi, au contraire de la chronologie établie par Cinotti (1996) à partir des données de diverses sources, dont le cadastre et l'enquête ministérielle « Teruti », la progression de la surface forestière française ne connaît pas de ralentissement à la fin du siècle. Cette expansion, soutenue dans le temps, en dépit d'un « minimum forestier » déjà lointain (situé dans la première moitié du XIX^e siècle, Mather *et al.*, 1999) suggère que la surface forestière reste encore éloignée d'un stade de saturation. Ce n'est pas contradictoire avec la vocation agricole du territoire national, ainsi que le caractère continu de la déprise agricole (Chakir et Madignier, 2006), pour un taux de boisement actuel qui atteint 30 %.

Cette expansion présente une forte structuration géographique. Actuellement, l'augmentation de surface est plus intense dans le sud du pays et en Bretagne (figure 2, p. 324). Ceci correspond aux zones de plus forte déprise agricole (Chakir et Madignier, 2006 ; Cavailles et Normandin,

III - Caractérisation de l'expansion des forêts françaises

ANAIS DENARDOU · JEAN-CHRISTOPHE HERVÉ · JEAN-LUC DUPOUEY ET AL.

1993). L'augmentation actuelle de surface forestière dans ces zones semble donc être principalement due à l'abandon des terres agricoles.

La diminution de surface dans le seul département de la Marne sur la période 1908-2010 reflète les forts déboisements que la Champagne crayeuse a connus vers 1950 pour l'extension des zones cultivées. Le taux de boisement du département est alors passé de 26,2 % à 9,0 % (Chevalier, 1972 ; Galbert *et al.*, 2015).

L'étude de l'évolution séculaire de la surface forestière française à partir des données d'inventaire et des données des statistiques anciennes (enquête Daubrée et statistique agricole de 1929) suggère une légère inflexion de la progression entre 1975 et 1980 (figure 8, p. 332). L'évolution de la surface à partir des données ancienne méthode de l'inventaire (c'est-à-dire avant 2005) a été effectuée par interpolation et extrapolation des données de façon très prudente, puisque la période d'étude n'est définie qu'à partir de l'année où 80 % des départements étaient déjà inventoriés (à partir de 1975). L'année 1980 correspondant à la date où 100 % des départements avaient un premier inventaire, on ne peut exclure que l'inflexion observée soit due au choix de la date de début d'étude et non pas à un phénomène réel.

Avec une augmentation de plus de 5 millions d'hectares sur 100 ans (> 2 millions d'hectares depuis 1975), et un doublement depuis le minimum forestier (Mather *et al.*, 1999), la part de forêts récentes dans la surface forestière française est aujourd'hui majeure. Ces forêts remplacent en grande partie des zones anciennement agricoles ayant connu une forte anthropisation, et soulèvent des enjeux fondamentaux quant à leur gestion et leur usage [dans leur rapport, Galbert *et al.* (2015) parlent ainsi de forêt « subie »] avec un potentiel de valorisation de biomasse nouveau pour des forêts dont la valeur patrimoniale est restreinte, à la fertilité de ces sols et leur productivité (Koerner *et al.*, 1999), ou encore à leur potentiel de séquestration de carbone (Laganière *et al.*, 2010). Il reste donc en tout premier lieu essentiel de pouvoir localiser précisément forêts récentes et anciennes (Rochel *et al.*, ce numéro), afin de prioriser les enjeux de gestion qui peuvent diverger (aspects patrimoniaux, et opportunité nouvelle d'extraction de biomasse dans un contexte d'accroissement de la valorisation du bois).

L'expansion, dont l'intensité est plus forte en stock sur pied qu'en surface (+ 17 % pour les surfaces contre + 59 % pour le stock sur pied entre 1975 et 2010), suggère que la forêt française se trouve dans une phase déjà avancée de cette expansion, où les surfaces plus ou moins récemment acquises sont dans une phase de capitalisation de leur stock. Un stade plus précoce est par exemple observé au Vietnam, où la surface forestière augmente plus vite que le stock sur pied (Kauppi *et al.*, 2006 ; FAO, 2015).

La forêt française a gagné 950 millions de mètres cubes en 35 ans. Ce chiffre est considérable, et correspond par exemple au stock sur pied des forêts de production de l'Espagne (944 millions de mètres cubes ; Forest Europe, 2015) et est à peine inférieur à celui de la Norvège et de la Turquie (respectivement 1 033 et 1 032 millions de mètres cubes). Entre 2005 et 2015, le stock sur pied a augmenté de 44 millions de m³/an, avec une incertitude d'une ampleur de 20 millions de mètres cubes. Cette incertitude est importante au regard de récents objectifs de politique forestière visant à mobiliser plus de bois dans les forêts françaises (augmentation des prélèvements annuels de 20 millions de mètres cubes ; Puech, 2009). Cela souligne la nécessité de conduire l'inventaire continu des forêts avec un nombre de points terrain suffisant pour examiner non seulement l'état des forêts, mais aussi les tendances qui les affectent. Le développement d'un inventaire multisource, déjà opérationnel dans les pays scandinaves, permettrait aussi de produire des estimations statistiques beaucoup plus précises et régionalisées (Tomppo, 2010). Le principe de ce type d'inventaire consiste à combiner de l'information spatiale à haute résolution et corrélée à l'état des forêts (photogrammétrie et lidar aériens, cartes d'usage des terres, etc.),

aux points d'inventaire de terrain. Son développement fait l'objet de travaux de recherche en cours à l'IGN.

La forte augmentation séculaire des surfaces dans le Massif central est à relier logiquement aux programmes de boisements, dont le Fonds forestier national (FFN), qui reste le plus important en termes de superficie plantée au niveau national (boisement net de l'ordre d'un million d'hectares ; Dodane, 2009) et qui s'est particulièrement concentré sur cet ensemble géographique de moyenne montagne (Betolaud, 1972). Cette politique, mise en place en 1946 et arrêtée en 1999, a été particulièrement active à ses débuts (60 000 ha/an ; Bazire, 1969) et s'est essentiellement concentrée sur les plantations résineuses (Bazire et Gadant, 1991). Dans le Massif central, entre 1953 et 1971, la superficie plantée en *Épicéa* est ainsi passée de 360 000 ha à 610 000 ha (Bouchon, 1984). La corrélation interdépartementale, sur l'ensemble du territoire, de 0,50 entre les variations de surface entre 1908 et 1975 et les variations de stock entre 1975 et 2010, montre que l'augmentation récente de stock en France est en partie reliée à une capitalisation des nouvelles surfaces (plantées ou provenant d'accruées spontanées). L'expansion relative en stock sur pied dans les forêts privées est aujourd'hui aussi forte dans les forêts feuillues que dans les forêts résineuses. Cependant, l'expansion en surface des forêts feuillues y est beaucoup plus forte. On peut donc anticiper une expansion future en stock des forêts privées feuillues considérable, et bien au-dessus de celle des forêts résineuses.

La non- ou faible gestion, et donc les faibles prélèvements, dans les nouvelles forêts, souvent dus à leur fort morcellement et à leur faible accessibilité (Galbert *et al.*, 2015), peuvent expliquer la forte augmentation du stock sur pied des forêts privées méditerranéennes.

L'expansion en surface et en stock sur pied concerne principalement les forêts privées (80% d'augmentation, et une contribution à l'expansion totale de 30% supérieure à son importance dans la forêt, tableau III, p. 328). À l'opposé, l'augmentation des surfaces dans les forêts domaniales reste faible (+ 106 000 ha). Étant liée à un processus d'acquisition de forêts et de soumission au régime forestier, elle est à la fois due à la politique d'aliénation et de reboisement des terrains de montagne (RTM, plus de 257 000 ha boisés aujourd'hui dans les forêts domaniales RTM ; Garet, 2015), et aux acquisitions de forêts principalement survenues au début du siècle (Galbert *et al.*, 2015 ; Bazire et Gadant, 1991). La forêt domaniale apparaît également comme la plus stable en termes de stock sur pied (+ 9 % sur 1975-2010, tableau III, p. 328), avec une décapitalisation apparente à la période récente, ce qui suggère que les prélèvements sont équivalents à la production biologique de ces forêts, voire en léger excès, à grande échelle spatiale et temporelle. Par comparaison, les AFPS qui comprennent la forêt communale soumise présentent une expansion relative bien plus marquée (+ 40 % de stock sur pied sur la période), alors qu'elles sont également soumises à l'aménagement forestier, et que leur stock sur pied à l'hectare est aujourd'hui, et en moyenne nationale, identique à celui des forêts domaniales (180 m³/ha). En revanche, leur contribution à l'expansion est bien plus modeste que celle des forêts privées, puisqu'elle est de 40 % inférieure à la part de ces forêts dans le stock national (tableau III, p. 328).

Si l'expansion des surfaces totales en forêt de production et du stock sur pied associé ne présente aucune saturation, une exploration de l'évolution du stock sur pied à l'hectare sur la période 1975-2010 révèle cependant une tendance au ralentissement dans les catégories de propriété AFPS et privé (données non présentées). Cette évolution peut admettre deux interprétations :

- l'adjonction de nouvelles surfaces forestières — dont le stock sur pied est par essence modeste — aux surfaces existantes ne peut que réduire le stock moyen à l'hectare, et ce ralentissement peut donc être la signature de l'expansion continue des surfaces ;
- il n'est pas impossible que ce stock à l'hectare — sur les forêts anciennement existantes comme le sont les forêts domaniales — connaisse une progression ralentie, qui attesterait d'une

III - Caractérisation de l'expansion des forêts françaises

ANNAIS DENARDOU - JEAN-CHRISTOPHE HERVÉ - JEAN-LUC DUPOUEY ET AL.

phase d'expansion plus avancée tendant à la stationnarité. Cette dernière hypothèse ne pourrait cependant être confortée qu'en examinant l'évolution historique du stock à l'hectare pour des forêts présentes à l'origine et en la comparant aux forêts plus récentes, ce qui nécessiterait d'asseoir les évaluations statistiques sur une délimitation spatiale de ces forêts, qui n'existe pas à ce jour (Rochelet *et al.*, ce numéro).

La quasi-stagnation des surfaces résineuses observée depuis 1987 semble être la marque à la fois de l'arrêt du FFN et des tempêtes de 1999 (dégâts de 138,5 millions de mètres cubes ; Ministère de l'Agriculture, 2003) et 2009 (43,3 millions de mètres cubes ; IFN, 2009) qui ont eu un fort impact sur les peuplements résineux du Sud-Ouest, du Massif central et du Nord-Est.

Contrairement à une idée généralement répandue (Moriniaux, 1999), l'enrésinement du territoire résultant essentiellement de programmes de boisements au XX^e siècle n'a pas conduit à une augmentation de leur prévalence relative. Au contraire, l'expansion des feuillus est plus marquée que celle des conifères (+ 2,8 millions d'hectares pour les forêts feuillues et 1,1 million d'hectares pour les résineux), et leur proportion respective n'a pas évolué en un siècle. La comparaison de la statistique Daubrée avec les données récentes de l'Inventaire forestier national suggère que la proportion de feuillus augmente principalement dans le Sud-Ouest qui a été très marqué par les tempêtes de 1999 et 2009 (Ministère de l'Agriculture, 2003 ; IFN, 2009), la Champagne qui, avant les déboisements de la moitié du siècle, avait été principalement boisée de résineux et plus particulièrement de Pin laricio et de Pin noir d'Autriche (Chevalier, 1972), la Corse et une partie du Massif central (figure 4, p. 326). Cependant, il est important d'observer une augmentation de la part des résineux dans trois régions :

- un arc au sud du Massif central allant du Tarn à la Drôme, très probablement à relier aux reboisements RTM. Ces départements sont en effet inclus dans la zone de reboisement RTM entre 1860 et 1911 par Metallié (1999) ;

- le Limousin, et des départements de Bourgogne (dont le Morvan) et de Franche-Comté qui ont été des régions emblématiques privilégiées par les reboisements FFN (Betolaud, 1972) ;

- la Bretagne qui a connu des reboisements importants tout au long du XX^e siècle (Pardé, 1962 ; Serrière-Chadœuf, 1986).

Ces résultats montrent l'importance d'étudier la dynamique forestière à différentes échelles spatiales, et indiquent que les constats parallèles d'un enrésinement forestier régional, et d'une proportion inchangée des feuillus et résineux au niveau national, sont compatibles.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce premier état des lieux montre que l'expansion forestière est d'un ordre de grandeur considérable, et hétérogène d'un point de vue géographique et foncier. Bien que le caractère plus marqué de l'expansion en stock suggère que la forêt française se situe dans une phase déjà avancée de la transition forestière, elle ne présente à ce jour aucun signe de saturation. Dans la mesure où les surfaces augmentent de façon continue, cela ne pourra contribuer qu'à accroître encore le stock total dans les prochaines décennies.

Par ailleurs, les expansions en surface et en stock concernent essentiellement la forêt privée et plus particulièrement la forêt privée feuillue. Ils soulignent tout l'enjeu de la prise en compte de cette double réalité (la forêt française est le premier stock feuillu en Europe, et la forêt privée y est majoritaire) dans la mise en œuvre des politiques publiques en charge de la valorisation de la forêt.

Ce programme de recherche sur l'expansion des forêts françaises se poursuit, et consistera à mener une analyse causale de cette expansion (en termes de processus démographiques, de flux de bois, et de contextes liés au triplet contextuel géographie/propriété/essence) afin d'en séparer et identifier quantitativement les mécanismes et la façon dont ils sont reliés aux différents systèmes sylvicoles présents en France.

<p>Anais DENARDOU IGN, Laboratoire d'Inventaire forestier (LIF) 14 rue Girardet F-54000 NANCY et INRA, Université de Lorraine, AgroParisTech, UMR Silva INRA Centre Grand Est Nancy F-54280 CHAMPENOIX (Anais.Denardou-Therand@ign.fr)</p>	<p>Jean-Christophe HERVÉ* – Timothée AUDINOT – Jean-Daniel BONTEMPS IGN, Laboratoire d'Inventaire forestier (LIF) 14 rue Girardet F-54000 NANCY (Jean-daniel.bontemps@ign.fr)</p>
<p>Jean-Luc DUPOUEY INRA, Université de Lorraine, AgroParisTech, UMR Silva INRA Centre Grand Est Nancy F-54280 CHAMPENOIX (jean-luc.dupouey@inra.fr)</p>	<p>Jean BIR IGN, Service de l'Inventaire forestier et environnemental Château des Barres F-45290 NOGENT-SUR-VERNISSON (jean.bir@ign.fr)</p>

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier l'ADEME, la région Lorraine et le LabEx ARBRE (ANR 11-LABX-0002) pour le financement de ces travaux.

Nos remerciements vont aussi au service de l'Inventaire forestier et environnemental de l'IGN pour sa contribution importante sur la mise à disposition et l'exploitation de données anciennes.

Enfin, nous dédions ce travail à Jean-Christophe Hervé, fondateur du Laboratoire d'Inventaire forestier (LIF), père de la thématique d'étude de l'expansion forestière, et décédé soudainement le 16 avril 2017.

BIBLIOGRAPHIE

- AUDINOT T., 2016. *Expansion de la surface forestière métropolitaine au cours de la première moitié du XX^e siècle : inter-comparaison et analyse de statistiques anciennes*. Rapport de projet tuteuré de master 1 FAGE - Université de Lorraine. 30 p.
- BAZIRE P., 1969. Quelques commentaires sur les activités du Fonds forestier national. *Revue forestière française*, vol. XXI, n° 6, pp. 525-535.
- BAZIRE P., GADANT J., 1991. *La Forêt en France*. Paris : La Documentation française. 142 p.
- BETOLAUD Y., 1972. Un quart de siècle au service de la forêt française. *Revue forestière française*, vol. XXIV, n° spécial « Le Fonds forestier national », pp. 501-504.
- BONTEMPS J.-D., 2016. Comprendre et simuler la dynamique des forêts françaises à large échelle. In : CGAAER. Groupe « forêt-bois », 9 novembre 2016.
- BOUCHON J., 1984. Importance des plantations de Douglas et Épicéa en France. *Revue forestière française*, vol. XXXVI, n° 4, pp. 254-258.
- CAVAILHES J., NORMANDIN D., 1993. Déprise agricole et boisement : état des lieux, enjeux et perspectives dans le cadre de la réforme de la PAC. *Revue forestière française*, vol. XLV, n° 4, pp. 465-482.
- CHAKIR R., MADIGNIER A.C., 2006. Analyse des changements d'occupation des sols en France entre 1992 et 2003. *Économie rurale*, n° 296, pp. 59-68.

III - Caractérisation de l'expansion des forêts françaises

ANAIS DENARDOU · JEAN-CHRISTOPHE HERVÉ · JEAN-LUC DUPOUEY ET AL.

- CHEVALIER Y., 1972. Métamorphoses de la Champagne crayeuse : déboisement et équilibre biologique. *Revue forestière française*, vol. XXIV, n° 4, pp. 303-310.
- CINOTTI B., 1996. Évolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIX^e siècle. *Revue forestière française*, vol. XLVIII, n° 6, pp. 547-562.
- DAUBRÉE L., FRANCE (Ministère de l'agriculture), Eaux et forêts, Direction générale, Eds, 1912. *Statistique et atlas des forêts de France par Lucien Daubrée d'après les renseignements fournis par les agents des eaux et forêts*. Paris : Imprimerie nationale. 2 vol. : 387 p., 337 p.
- DODANE C., 2009. *Les nouvelles forêts du Massif central : enjeux sociétaux et territoriaux. Ces hommes qui plantaient des résineux pour éviter la friche*. Lyon : École normale supérieure Lettres et Sciences humaines (Thèse géographie).
- EUROPEAN COMMISSION, 2015. *Sustainable Agriculture, Forestry and Fisheries in the Bioeconomy. A Challenge for Europe – 4th SCAR Foresight Exercise*. 137 p.
- FAO, 2000. *Global Forest Resources Assessment 2000. FAO forestry paper 140*. 511 p.
- FAO, 2015. *Évaluation des ressources forestières mondiales 2015*. Rome : FAO. 245 p.
- FOREST EUROPE, 2015. *Full State of Europe's Forests 2015*. Madrid. 314 p.
- GALBERT M. de, MAGRUM M., MORIN G.-A., 2015. Valorisation agricole et forestière de l'espace rural. CGAAER. Rapport n° 14064. 165 p.
- GARET E., 2015. *Le Coût national annuel de maintien ou confortement des peuplements forestiers de protection en montagne*. Nancy : AgroParisTech-centre de Nancy (Rapport de stage de deuxième année d'école d'ingénieur).
- GSCHWANTNER T., LANZ A., VIDAL C., BOSELA M., DI COSMO L., FRIDMAN J., GASPARINI P., KULIESIS A., SCHADAUER K., 2016. Comparison of methods used in European National Forest Inventories for the estimation of volume increment: towards harmonization. *Annals of Forest Science*, vol. 73, issue 4, pp. 807-821.
- HERVÉ J.-C., WURPILOT S., VIDAL C., ROMAN-AMAT B., 2014. L'inventaire des ressources forestières en France : un nouveau regard sur de nouvelles forêts. *Revue forestière française*, vol. LXVI, n° 3, pp. 247-260.
- IFN, 1985. *But et méthodes de l'inventaire forestier national*. Paris : Inventaire forestier national. 68 p.
- IFN, 2008. La Forêt française. Résultats des trois premières campagnes nationales annuelles. *L'IF*, n° 19.
- IFN, 2009. Tempête Klaus du 24 janvier 2009 : 234 000 hectares de forêt affectés à plus de 40 %, 42,5 millions de mètres cubes de dégât. *L'IF*, n° 21.
- IFN, 2011. Une nouvelle partition écologique et forestière du territoire métropolitain : les sylvoécotons (SER). *L'IF*, n° 26.
- IGN, 2014. Les données de l'inventaire forestier : état des lieux et évolution. *L'IF*, n° 34.
- IGN, 2016. La Forêt en chiffres et en cartes. *Le mémento*. 17 p.
- KAUPPI P.E., AUSUBEL J.H., FANG J., MATHER A.S., SEDJO R.A., WAGGONER P.E., 2006. Returning forests analyzed with the forest identity. *PNAS*, vol. 103, n° 46, pp. 17574-17579.
- KOERNER W., BENOÎT M., DAMBRINE E., DUPOUEY J.-L., 1999. Influence des anciennes pratiques agricoles sur la végétation et les sols des forêts reboisées dans le massif vosgien. *Revue forestière française*, vol. LI, n° 2, pp. 231-238.
- LAGANIERE J., ANGERS D.A., PARE D., 2010. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation : a meta-analysis. *Global Change Biology*, n° 16, pp. 439-453.
- MAAF, 2016. *Programme national de la forêt et du bois 2016-2026*. 58 p.
- MATHER A.S., 1992. The forest transition. *Area*, vol. 24, n° 4, 1992, pp. 367-379.
- MATHER A.S., FAIRBAIRN J., NEEDLE C.L., 1999. The Course and Drivers of the Forest Transition : the case of France. *Journal of Rural Studies*, vol. 15, n° 1, pp. 65-90.
- METALIE J.-P., 1999. Los bosques de Francia en los siglos XIX y XX : Bosques nuevos y nuevas investigaciones. *Historia agraria*, 1999, n° 18, pp. 33-55.
- MEYFROIDT P., LAMBIN E.F., 2011. Global Forest Transition: Prospects for an End to Deforestation. *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 36, pp. 343-371.
- MEYFROIDT P., RUDEL T.K., LAMBIN E.F., 2011. Forest transitions, trade, and the global displacement of land use. *PNAS*, vol. 107, n° 49, pp. 20917-20922.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, 2003. Après les tempêtes de décembre 1999, la filière forêt bois sort de l'épreuve. *Agreste Primeur*, n° 120.
- MINISTERIUM FÜR ELSASS-LOTHRINGEN, 1909. *Beiträge zur Forststatistik von Elsass-Lothringen*, Strasbourg, vol. 26.

- MORINIAUX V., 1999. Les Français face à l'enrésinement, XVI^e-XX^e siècles. *Annales de Géographie*, n° 609-610, pp. 660-663.
- MORNEAU F., DUPREZ C., HERVÉ J.-C., 2008. Les forêts mélangées en France métropolitaine. Caractérisation à partir des résultats de l'Inventaire forestier national. *Revue forestière française*, vol. LX, n° 2, pp. 107-120.
- PARDÉ J., 1962. Aperçu sur la productivité des plantations résineuses en Bretagne. *Revue forestière française*, n° 5, pp. 402-416.
- PIGNARD G., 2000. Évolution récente des forêts françaises : surface, volume sur pied, productivité. *Revue forestière française*, vol. LII, n° spécial, pp. 27-36.
- PUECH J., 2009. Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois. Rapport. 74 p.
- SERRIÈRE-CHADŒUF I., 1986. Production et sylviculture de l'Épicéa de Sitka en France. *Revue forestière française*, vol. XXXVIII, n° 2, pp. 140-148.
- TOMPPQ E., GSCHWANTNER T., LAWRENCE M., MCROBERTS R.E., 2010. *National Forest Inventories: pathways for common reporting*. Heidelberg: Springer.
- UNCED, 1992. *Report of the United Nations Conference on environment and development*, Rio de Janeiro, 1992.

L'EXPANSION SÉCULAIRE DES FORÊTS FRANÇAISES EST DOMINÉE PAR L'ACCROISSEMENT DU STOCK SUR PIED ET NE SATURE PAS DANS LE TEMPS (Résumé)

L'expansion en surface et en stock sur pied de la forêt française est étudiée à partir des données d'inventaire forestier national et de la statistique Daubrée (1908). Son hétérogénéité géographique, selon la propriété (privée, domaniale, autre forêt publique soumise), et la composition ligneuse (feuillus/résineux) a été examinée. Entre 1908 et 2010, l'augmentation de surface est de 5,1 millions d'hectares (+ 50 %), d'intensité maximale dans le Massif central, et deux fois plus forte dans les feuillus que dans les résineux, pour une proportion globale inchangée. Entre 1975 et 2010, le stock sur pied (+ 59 %, + 930 millions de mètres cubes) a évolué trois fois plus rapidement que la surface, avec une géographie différenciée : plus marquée dans le sud du pays et la Bretagne pour les surfaces, et dans le Massif central pour le stock, indiquant une certaine continuité avec l'expansion antérieure en surface. Sur la même période, les forêts privées et les autres forêts publiques soumises présentent des variations relatives de surfaces similaires (+ 20 %), mais les premières ont connu une capitalisation deux fois plus forte de leur stock (+ 80 %). Entre 1987 et 1994, la forêt privée feuillue présente les plus fortes progressions (+ 280 000 ha et + 105 millions de mètres cubes), suivie par la forêt privée résineuse (+ 60 000 ha et + 63 millions de mètres cubes). Sur la décennie récente (2006-2015), l'augmentation des surfaces et des stocks se maintient au rythme de 120 000 ha/an et 44 millions de mètres cubes par an, ce qui suggère sa poursuite au cours des prochaines décennies.

THE CENTURIES-LONG EXPANSION OF FRENCH FORESTS, DRIVEN PREVALENTLY BY INCREASED GROWING STOCK, SHOWS NO SIGN OF SATURATION (Abstract)

The expansion of French forests both in surface area and growing stock is explored based on National Forest Inventory data and Daubrée's statistics (1908). The author studied their geographic variability under various ownership schemes (private, state or other regulated public forests) and depending on their composition (hardwood/softwood). Between 1908 and 2010, the increase in surface area was 5.1 million hectares (+ 50 %) with the fastest expansion rate in the Massif Central, and hardwoods gaining ground twice as fast as softwoods, although their overall proportions remained unchanged. Between 1975 and 2010, growing stock (+ 59 %, + 930 million cubic metres) developed three times more quickly than surface area but varied considerably between geographic locations: with area taking the lead in southern France and Brittany while in the Massif Central growing stock was preminent, pointing to a certain continuity in relation to previous expansion of forest area. Over the same period, private forests and other regulated public forests experienced similar relative surface area variations (+ 20 %), but private forests accumulated twice as much growing stock (+ 80 %) as public forests. Between 1987 and 1994, private deciduous forests increased the most (+ 280 000 ha and + 105 million cubic metres), followed by private coniferous forests (+ 60 000 ha and + 63 million cubic metres). In the recent decade (2006-2015), increases in areas and stocks have continued at a pace of respectively 120 000 ha/year and 44 million cubic metres suggesting that this trend will continue over coming decades.

3 Article 2

Article 2 : Unprecedented contemporary (1976-2014) increase in the growing stock of French forests is persistent and dominated by private broadleaved forests

En français : l'expansion actuelle (1976-2014), sans précédent, en stock sur pied des forêts françaises ne présente pas de saturation et est dominée par les forêts privées feuillues

Anaïs Denardou, Jean-Luc Dupouey, Jean-Christophe Hervé, Jean Bir, François Morneau, Jean-Daniel Bontemps

European Journal of Forest Research, en révision

Objectifs de l'article

Cet article présente une étude essentiellement centrée sur le stock de bois sur pied des forêts françaises entre 1976 et 2010 à partir des données de l'inventaire forestier national. L'étude présente trois parties :

- Une description des changements d'un point de vue spatial (selon les départements) et temporel de la surface, du stock sur pied et de la densité de stock sur pied (volume à l'hectare) des forêts françaises.
- Une analyse des changements de rythme d'expansion en surface, stock sur pied et densité de stock afin de déceler la possible présence d'une accélération ou d'une saturation.
- Une exploration de l'effet d'attributs forestiers (stock et densité initiaux et augmentation récente de surface) sur les changements de stocks à partir de modèles statistiques linéaires.

Matériel et méthodes

Les analyses se basent exclusivement sur les données de l'inventaire forestier national. Les forêts ont été stratifiées par types de propriété (privé, domanial et autres forêts publiques –

OPF) et composition (feuillus ou résineux dominants), permettant d’approcher des causes différentes de la variabilité de l’expansion : gestion, expansion naturelle, plantations, *etc.*

Les chronologies des changements en surface, en stock et en densité de stock ont été analysées. Un intervalle de confiance à 95% pour les chronologies de surface et de stock sur pied a pu être calculé à partir des erreurs statistiques de l’inventaire forestier national en utilisant une approche de ré-échantillonnage (« bootstrap », Efron, 1982). De plus, une analyse de la localisation de ces changements a aussi été effectuée.

Chaque inter-cycle (période entre deux inventaires) départementaux a été attribué à une sous-période (1 ou 2), séparées par l’année médiane d’inventaire. Ainsi, la variation de la vitesse d’expansion entre les inter-cycles de la première période et ceux de la deuxième a pu être analysée.

Enfin, en utilisant une méthode de régression linéaire (moindres carrés généralisés), il a été possible d’approcher les mécanismes d’expansion. Ce modèle relie les variations de stock sur pied au stock initial (effet capital-production), à la densité initiale (effet de saturation) et à l’augmentation passée des surfaces forestières (effet du développement différé du stock par rapport aux surfaces).

Résultats principaux

Entre 1976 et 2010, le stock sur pied des forêts françaises a augmenté trois fois plus rapidement que les surfaces (+57% pour les stocks contre +17% pour les surfaces). Alors que l’expansion en surface est principalement localisée dans le Sud-Est et la Bretagne, les plus fortes augmentations de stock et de densité se trouvent dans le centre de la France (Massif Central et Bourgogne), traduisant deux réalités différentes : des accrues naturelles liées à l’abandon de terres agricoles, principalement, pour les surfaces et la densification d’anciennes plantations (dont les plantations du Fonds Forestier National) pour les stocks et la densité.

Les forêts privées, qui étaient initialement les moins denses (104 m³/ha contre 183 m³/ha pour les forêts domaniales et 156 m³/ha pour les autres forêts publiques soumises) ont connu les expansions en surface, en stock et en densité de stock les plus fortes, se rapprochant progressivement des densités des forêts publiques. Parmi les forêts privées, entre 1987 et 1994, les forêts feuillues, majoritairement liées aux accrues naturels, ont connu

III - Caractérisation de l'expansion des forêts françaises

les expansions en surface et en stock les plus importantes mais les forêts résineuses présentent une plus forte densification.

Aucune saturation n'a été observée ni en surface ni en stock. Une accélération est même observée dans les forêts privées. La forêt française semble donc constituer un puits croissant de carbone qui devrait se maintenir pour les prochaines décennies.

L'approche par modèle a montré que les changements de stock dépendent du stock initial (+), par un effet de capital-dépendance, de l'augmentation passée de surface (+) et de la densité initiale (-), traduisant la manifestation d'un terme de freinage, mais dont l'intensité est d'un ordre de grandeur inférieur à celui du capital initial. La densité de stock a un effet plus important sur la période récente que sur la première période, signe d'une limitation possible de l'expansion en stock. Cependant, l'effet le plus important est celui du stock initial, expliquant pourquoi aucune saturation n'est encore relevée au plan phénoménologique.

Conclusion

Cet article a permis de montrer que l'étude de l'expansion en surface des forêts peut et doit être étendue aux stocks.

Nos résultats montrent que le stock sur pied des forêts françaises, de par l'intensité de son expansion et l'absence de décélération de celle-ci, devrait continuer à augmenter de façon soutenue dans les prochaines décennies.

Article 2 *in extenso*

Voir page suivante.

Unprecedented contemporary (1976-2014) increase in the growing stock of French forests is persistent and dominated by private broadleaved forests

Anaïs Denardou^{1,2}, Jean-Luc Dupouey², Jean-Christophe Hervé^{1,a}, Jean Bir³, François Morneau³ and Jean-Daniel Bontemps^{1,*}

¹ IGN, Laboratoire d'Inventaire Forestier (LIF), 14 rue Girardet, 54000 Nancy, France; Anaïs.Denardou-Tisserand@ign.fr ORCID number: 0000-0002-4828-276X, Jean-Daniel.Bontemps@ign.fr

² Université de Lorraine, AgroParisTech, INRA, UMR_A 1434 Silva, 54000 Nancy, France; jean-luc.dupouey@inra.fr

³ IGN, Service de l'inventaire forestier et environnemental, Château des Barres, 45290 Nogent-sur-Vernisson, France; Jean.Bir@ign.fr, Francois.Morneau@ign.fr

^a passed away on April 16th 2017

* Correspondence: Jean-Daniel.Bontemps@ign.fr; Tel.: +33-143-986-266

Abstract: The growing stock (GS) of European forests has been shown to strongly increase, a change that remains poorly understood and of unknown temporal extent. We used French national forest inventory data collected over 40 years forests that show the greatest forest changes in Europe to: i) evaluate the magnitude of area, GS, and GS density (GSD) changes and analyze their patterns across ownership and forest composition hypothesized to structure these changes for forest policy and land-use reasons, ii) infer whether expansion is steady or transient, and iii) investigate the quantitative role of areal changes and initial GS and GSD on GS changes by regression modelling. Over the study period, forest area increased by + 17%. GS increased three-times faster than area, providing evidence for strong forest densification. Low-stocked private forests, not submitted to binding management plans, exhibited the greatest rates of change in GS and GSD, highlighting their management deficit. Area and GS changes were the highest in private broadleaved forests, stressing the influence of current natural recolonization on abandoned agricultural lands. Steady trends in GS/area changes across forest compartments together with accelerations in private forests were found. Also, regression models showed the positive contribution of recent areal increases and initial GS in the GS expansion, without any strong footprint of downregulation by GSD. The C-sink of French forests is expected to persist in future decades and play a role in climate change attenuation in view of its magnitude.

Keywords: forest transition; forest expansion; forest inventory; area; growing stock; carbon stock

Acknowledgments: This work was financially supported by the French Environment and Energy Management Agency (ADEME), the Lorraine region and the Labex ARBRE (ANR 11-LABX-0002).

We thank the French forest inventory service of IGN for providing important contributions and allowing us to use the first inventories.

This work is dedicated to Jean-Christophe Hervé, creator of the Laboratory of the French forest inventory (LIF), who initiated this work on forest expansion and who died suddenly on April 16, 2017

1. Introduction

After centuries of decrease, the forest area of most developed countries has increased over recent decades or centuries (Meyfroidt and Lambin 2011), a phenomenon termed “forest transition” (Mather 1992; Rudel et al. 2010) that partly finds root in agricultural land abandonment (Keenleyside and Tucker 2010). While the volume of the growing stock (GS) is a major attribute of forests, encompassed in the concept of “forest identity” (Kauppi et al. 2006), less focus has been placed on its temporal course. Statistics on European forests (EU-28) reveal recent net increases in both forest area and GS (+0.35%/year for area and +1.33%/year for GS between 1990 and 2015) (FAO 2015), with this regional trend being unique globally. These forests are also the most intensively harvested (1.7% of the GS harvested every year), indicating the importance of the gross forest growth after extended periods of intense depletion of wood resources (Mather 2001; Glatzel 1999).

Increases in forest GS result from both the accumulation of new forests through area extension and the densification of forests. Forest densification depends on the balance between growth, harvest, and mortality (growth can be important to the point where even significant harvests and mortality do not limit net GS expansion). Many drivers control this balance, including low-intensity harvesting, management abandonment, growth recovery after decades of depletion (Glatzel 1999), plantations of fast-growing species or improved genetic provenances, and the development of new forests on previous farmlands with improved soil fertility (Koerner et al. 1997). Furthermore, the increase in forest growth induced by anthropogenic changes in forest nutrition (Kahle et al. 2008; Bontemps et al. 2011) as well as climatic change (Boisvenue and Running 2006; Charru et al. 2017) might significantly impact the growing stock (Henttonen et al. 2017). However, climate change also plays a role in tree mortality (Allen et al. 2010).

Major societal issues are associated with the increase in the forest growing stock, including options for the more intensive use of forest resources in the European bio-economy perspective (European commission 2015), for increased carbon sequestration (Houghton 1999; Rhemtulla 2009; Li et al. 2016), and substitution for fossil fuel emissions in a climatic change mitigation perspective. The extent to which this trend is steady and will be maintained in the future is, therefore, of primary concern. Yet, knowledge and theoretical predictions on the temporal course of GS remain very limited. Nabuurs et al. (2013) suggested that the first signs of saturation in the carbon sink of European forests have already appeared, especially in Western Europe. Conflicting this view, changes in GS between 1990 and 2015 across European countries (Forest Europe 2015) present a strong positive correlation with GS in 1990, whereas the correlation with GS density (volume per hectare, GSD) was only slightly negative, suggesting that saturation is implausible in the near future.

This knowledge gap highlights the absence of consistent forest data over the long term, as national forest inventories (NFI) were initiated in the 1920s in European boreal countries and were subsequently set up in other industrialized countries up to the very recent present, often with historical methodological changes (Tomppo et al. 2010). Thus, long-term and country-scale insights into GS expansion have been delivered for very few countries (Sweden in Egnell et al. 2011; Finland in Henttonen et al. 2017; USA in Brad Smith et al. 2004). The increasing availability of NFI data in Europe is however facilitating the analysis of this issue over periods of pluri-decennial extent in an increasing number of countries, including France (Pignard 2000).

Among European countries (EU-28), forests in France have shown the strongest increases in both forest area (+110,000 ha/yr, together with those in Spain; Forest Europe 2015) and GS (+35 million cubic meters per year, or hm^3/yr) over the last decade (2005–2015), forming a demonstrative case study of forest expansion. France was also the seminal case study for Mather’s theory of forest transition (Mather et al. 1999). GS shows a relative increase greater than the forest area (+1.3%/year between 2005 and 2015 compared with +0.65%/year for area; Forest Europe 2015), suggesting that forest densification plays a significant role in this increase. While GS has probably doubled over the past 50 years (Hervé et al. 2014), ancient forest-area statistics (Daubrée 1912) indicate that the forest area may have increased by 60% during the 20th century. In 1990, forests in France hence had the second greatest forest carbon stock among the EU-27 (734 Tg C) (Karjalainen et al. 2003) after Sweden (904 Tg C) and close to Germany (712 Tg C).

Possible causes for this expansion and its magnitude are related to land-use, forest planning, and forest policy issues. First, the French territory has a long-lasting agricultural history, and a current utilized agricultural area of over 50% for an afforested area of 31%, among the lowest in Europe (Forest Europe 2015). Low afforestation rates may imply greater areal expansion over agricultural lands. A significant part of the French agricultural area is composed of poor lands with restricted ability for cultivation and has thus been prone to abandonment, especially in mountainous and Mediterranean ranges (MacDonald et al. 2000; Abadie et al. 2017). Second, private forest ownership dominates the French forests, representing more than 75% of forested area, and is mostly naturally expanding over properties much smaller than 50 ha, particularly in the central mountain range of France (“Massif Central”; Normandin 1979), affected for long by land abandonment. In contrast to public forests, private forests, are not subjected to a legally-binding management plan including harvest planning (“Aménagement forestier” enforced by the forest law), and only 22% are associated with an information and management document (“Plan Simple de Gestion”, Boutefeux 2005). Finally, afforestation (mostly coniferous) has expanded through different forest policy programs throughout the 20th century including the post-war national program “Fonds Forestier National” (FFN, or national forest fund program)

(Pourtet 1972; Dodane 2009) that ran from 1946 to 1999 and represented *ca* 800 000 ha of net afforestation (Dodane 2009).

Consequently, geographic location, forest ownership and composition are hypothesized to form factors of major importance in the partitioning of forest expansion at a country level and draw attention onto the underlying heterogeneities of a country's forest expansion. Such heterogeneities remain uncovered to date, as international reporting (State of Europe's forests; Forest Europe 2015, global FRA report; FAO 2015) delivers only country-scale and present status statistics.

As indicated, spatial variations of the expansion might primarily reflect land-use determinants (e.g., privileged expansion in marginal agricultural lands; MacDonald et al. 2000; Strijker 2005). Ownership-driven variations might result from differential land management choices (e.g., lower harvest of wood in small-sized private forests; Schmithüsen and Hirsch 2010). Tree species composition-related variation might highlight maturation in afforested coniferous forests in Europe over the 20th century (Dedrick et al. 2007). Pignard (2000) explored the recent expansion of French forests with respect to area, GS, and GSD, and observed a larger increase in the area of broadleaved forests, and a greater increase in GS and GSD in private forests.

In this study, we first quantified forest expansion, and explored its dependence on forest ownership and composition and its spatial variations, in order to detect existing expansion heterogeneities. Second, we investigated indices of temporal changes in the area, GS and GSD expansions in order to assess possible changes in the pace of forest expansion (from acceleration to saturation). Finally, we investigated how GS changes are depending on forest attributes, including recent area changes, initial GS and GSD states using regression modelling.

2. Materials and Methods

2.1. The French NFI program

The French forest inventory was initiated in 1961 and was initially conducted by “department” administrative units (*dau*) at a pace of about one *dau* every 12 years (first method of inventory, M1) (Robert et al. 2010). From 2005 onwards, the inventory became continuous, with the whole afforested area being inventoried every year at a weaker intensity (second method or M2; Hervé 2016). In both methods, plots were temporary.

Collection of ground data is restricted to “production” forests (*i.e.* forests where no constraint hampers the potential harvest of wood; Hervé 2016) over the metropolitan territory, representing 95% of the total forest area in 2010 (16.4 Mha). This proportion has been almost constant since 1980. In this study, we only analyzed these production forests, and poplar plantations were also removed (they represent less than 200,000 ha, *i.e.* less than

1.2% of the total production forest area). Forests in our study ultimately represented 94% of the current total forested area.

2.2. Definitions of area and growing stock

The forest state of a surface is defined by minimum area, minimum width, tree cover, and potential tree height, in accordance with the principles of the international definition for forests (FAO 2004), which was adopted in method M2. In both inventory methods, forest was defined as a minimum surface of 0.5 ha and a minimum tree cover of 10%. Criteria for minimum width and potential tree height have varied between methods M1 and M2, making method M2 more sensitive than M1 to natural afforestation (**Material S1**). This was taken into account in how analyses were performed. Other details are specified in **Material S1**.

Within plots belonging to surfaces classified as forests, the volume of the GS is defined as the sum of stem volumes from the ground up to a minimal cross-sectional diameter of 7 cm for trees with a dbh greater than 7.5 cm. This definition has remained constant throughout the study period. Volume estimates were based on massive girth and height measurements at a departmental scale before 2005 (M1) and subsequently, on countrywide volume equations (M2). Temporal continuity was verified by the French NFI.

2.3. Stratification factors of forest expansion

Forests were partitioned according to three factors, including geographical units (*dau*; 90 units), property ownership (hereafter ownership), and dominant composition (botanic class of tree species).

Ownership comprises State's forests, other public forests (OPF, belonging to regional and local public authorities), and private forests. Since identified OPF are those under a public management plan (forest law), OPF with no management plan at the date of inventory have been classified as private forests since their origin.

The composition in tree species was analyzed as a two-level factor, describing the dominant botanic class; broadleaved or coniferous-dominated forests. Forest composition was defined from tree crown projection on the ground in inventory plots (more than 50% of a given composition). Data for composition from the first *dau* inventories were not available (**Table 1**). In the following inventories, composition was not described for plots with restricted tree cover (below 10% before 2005 -M1-, and below 15% thereafter -M2). These forests represent 8% of the total forest productive area and 0.3% of the total GS on average over 2006–2014. Consequently, these forests were discarded from analyses involving this compositional attribute.

For the purpose of this study, “stratum” was used to describe a forest category defined by either a one-factor level (e.g., private forests) or crossed-factor levels (e.g., the State’s broadleaved forests).

Table 1 Properties of the national forest inventory data used in the study

Period	First method of inventory (M1)		Second method of inventory (M2)
	1961–1979	1976–2004	2005–2014
Spatial sampling scale	Department administrative unit (dau)		National
Time interval between two inventories	12 years on average		Annual
Information on forest composition	No	Yes	Yes
Number of <i>dau</i> and inventories	74 <i>dau</i> x 1 inventory 5 <i>dau</i> x 2 inventories	1 <i>dau</i> x 1 inventory 69 <i>dau</i> x 2 inventories 20 <i>dau</i> x 3 inventories	All forests every year

dau: department administrative unit. Since the inventory in method M1 was asynchronous between *dau*, periods in this method are overlapping

2.4. Patterns and magnitude of forest expansion at the country scale and across ownership and species composition (objective 1)

Changes to forest area, GS, and GSD were estimated from the whole dataset (M1 and M2 periods of inventory) to provide the longest possible view on forest expansion.

In the NFI method M1 (see 2.1), data were asynchronously collected across *dau*. Linear interpolations of *dau* statistics were implemented and aggregated across strata. Bilateral confidence intervals at a level of 95% for the annual area and GS were calculated using bootstrap sampling from statistical errors of forest inventory attributes, as soon as errors were documented (**Material S2**). The origin of the study period was defined conservatively as the year from which 80% of the *dau* had already been inventoried at least once (*i.e.* 1976) (data for the remaining 20% *dau* were linearly backcasted). Averages of annual forest estimates were computed over statistics 2006–2014 (M2) to increase their statistical accuracy, and were used as the endpoints of the interpolations. The median year of this recent period was 2010. The total study period was therefore 1976–2010 (**FigS1**). An exception concerned analyses based on forest composition, for which the starting year was 1987. Moreover, the assessment of plot species composition was disrupted between methods M1 and M2, which did not allow the consolidation of their respective estimates. Thus, for composition data, only method M1 was used and the study period was restricted to 1987–1994 (see 2.3).

GSD (growing stock density) was calculated as the ratio between forest GS and forest area after interpolation.

The differences in area, GS, and GSD between 1976 and 2010 (or 1987–1994 for ownership x composition analysis) were tested (t-test) against zero using *dau* units as the population under study for whole forest, ownership-related strata, or ownership x composition strata. The different tests were performed onto distinct strata (determined by ownership, or ownership x composition) and therefore apply to independent populations. Maps of countrywide forest expansion for these different strata were also generated at a *dau* resolution.

To quantify inequality in expansion among ownership and composition strata over the study period, we defined a ratio (R, unitless) of the relative importance of the stratum in the countrywide expansion (percentage of the total flux of area or GS, *i.e.* percentage in the expansion, or P_e) relative to the countrywide initial relative importance of the stratum (P_0 , initial percentage in the forest):

$$R = P_e / P_0, \quad (1)$$

Values greater than one (resp. <1) indicate that the contribution of the stratum is more (less) than proportional to its initial importance in the forest. Consequently, the importance of strata with $R > 1$ (resp. < 1) increases (resp. decrease) in the forests over the study period.

2.5. Temporal changes in the rates of area, GS, and GSD change (objective 2)

To assess the (non)stationarity of forest changes and the nature of forest expansion (from acceleration to saturation), temporal changes in area, GS, and GSD rates of change (RC) were investigated by splitting the whole study period into two sub-periods.

All available between-inventory intervals were attributed to one subperiod (P_1 or P_2) according to the median year of selected *dau* inventories (between-inventory intervals that overlapped the two periods were attributed to the period – P_1 or P_2 – that they mostly overlapped).

The whole period could be covered for the GS, but not for the area. Since the change in forest definition between M1 and M2 affected estimates of forest area (see 2.2), the area analyses were restricted to method M1 only. Thus, the median year was 1990 for GS, and 1985 for area and GSD. Because of this restriction, eight *dau* were removed from the area analysis because they had only one or two inventories (a minimum of three is needed to assess changes in RC). For the composition-based analysis, the median year was 1997 for GS and 1990 for area and GSD (see 2.3).

In 1999 (‘Klaus’) and 2009 (‘Lothar’), two storms hugely impacted the growing stock of French forests. While Klaus damaged many *dau* across the territory, the impact of Lothar was particularly significant in two *dau* (‘Landes’ and ‘Gironde’). These *dau* were discarded from the GS and GSD studies.

Six pairs of rare *dau*-ownership categories (smaller than 400 ha) were not inventoried under M2 and were discarded from this study.

Rates of change (RC) associated with P1 and P2 (RC_i , $i = 1$ or 2) were calculated as:

$$RC_{ij} = \Delta X_{ij} / \Delta t_{ij}, \quad (2)$$

Where, X is the area, GS, or GSD, i is the period index, j is the *dau* index, and ΔX is the difference over the interval (between-inventory period, BIP).

The temporal changes in RC (TCRC) were computed as:

$$TCRC_j = RC_{2j} - RC_{1j}, \quad (3)$$

Positive RC with negative/positive TCRC indicated a decrease/increase in expansion rate. Conversely, negative RC with positive/negative TCRC indicated a slowing/accelerating decrease, respectively. The RC of opposite signs indicated trend inversions (**Table S2**).

Weighted paired t-tests comparing the RC statistics were performed for the entire forest and for each ownership and ownership x composition stratum, using *dau* as repetitions. Again, the statistical populations defined by the strata of the different partitioning sets (ownership, or ownership x composition) were independent. Initial growing stocks (resp. areas) were used to weight the t-tests for GS and GSD (resp. area).

Complementary investigations consisted in comparing the most recent changes estimated on inventory method M2 with those of the whole study period (**Material S3**).

2.6. Proximal drivers of GS variations (objective 3)

The quantitative influence of attributes of forest state and dynamics on GS changes was explored using a multiple regression approach on statistical units defined by *dau*-based BIP.

The studied attributes included: i) the initial growing stock of the unit (GS_i), hypothesized to contribute to the GS changes through a “law of mass action” paradigm (Berryman 1992), ii) the initial mean growing stock density of the unit (GSD_i), hypothesized to capture the competitive downregulation in the expansion, and iii) recent increases in forest area over the one or two previous BIP (ΔS_{-1} and ΔS_{-2}), which were tested for their delayed contribution to the growing stock (negative changes were set to 0). Since the timespan (Δt) of BIP is not constant, all these effects were assumed to be proportional on Δt .

Two further effects were controlled for: i) decreases in the forest area contemporary to the study BIP (ΔS , set to 0 for positive values), as these decreases immediately imply a reduction in the growing stock (not depending on Δt), ii) the timespan of the BIP (Δt).

Statistically, the associated model is written as a stochastic process:

$$\Delta GS = a \Delta t + b GS_i \Delta t + c GSD_i \Delta t + d \Delta S_{-1} \Delta t + e \Delta S_{-2} \Delta t + f \Delta S + \varepsilon, \quad (4)$$

Where the error, ε , is a stochastic component prone to depend on Δt and ΔGS .

The alternative option of factoring Δt and model $\Delta GS/\Delta t$ was not retained, as ε depended on GS_i in preliminary explorations. Thus, heteroskedasticity was handled by fitting the model using a generalized least-square (GLS) criterion allowing the variance of ε , $V(\varepsilon)$ to be modeled as a function of GS_i . Variance proportional to GS_i was found to be best suited ($V[\varepsilon] \propto GS_i$).

Models were fitted to two nested datasets, one using ΔS_{-1} only (188 BIP) and the other including both ΔS_{-1} and ΔS_{-2} (99 BIP). Models were fitted using the entire dataset or by ownership and ownership x composition strata. As in section 2.5, the rare pairs of *dau*-ownership categories and the BIP most impacted by the Klaus storm were discarded.

3. Results

3.1. Patterns and magnitude of forest expansion at the country scale and across ownership and species composition (objective 1)

3.1.1. Country-scale forest changes

Over the study period, the French forest area and GS increased (+2.3 Mha and +906 hm^3 ; **Fig1**) by 17 and 57%, respectively (**Fig2**). Thus, the relative increase in GS was more than three-fold greater than that in the area, indicating that forest densification is a major driver of GS change. Accordingly, the average GSD increased by 32%, from 123 to 162 m^3/ha . Confidence envelopes were found narrow in view of the ongoing forest changes detected. Almost all *dau* showed an increase in forest area and GS (**Fig3**), highlighting the extensive nature of forest expansion across the territory. Across-*dau* changes in total forest area, GS, and GSD were highly significant ($p < 10^{-10}$ for area, GS, and GSD).

III - Caractérisation de l'expansion des forêts françaises

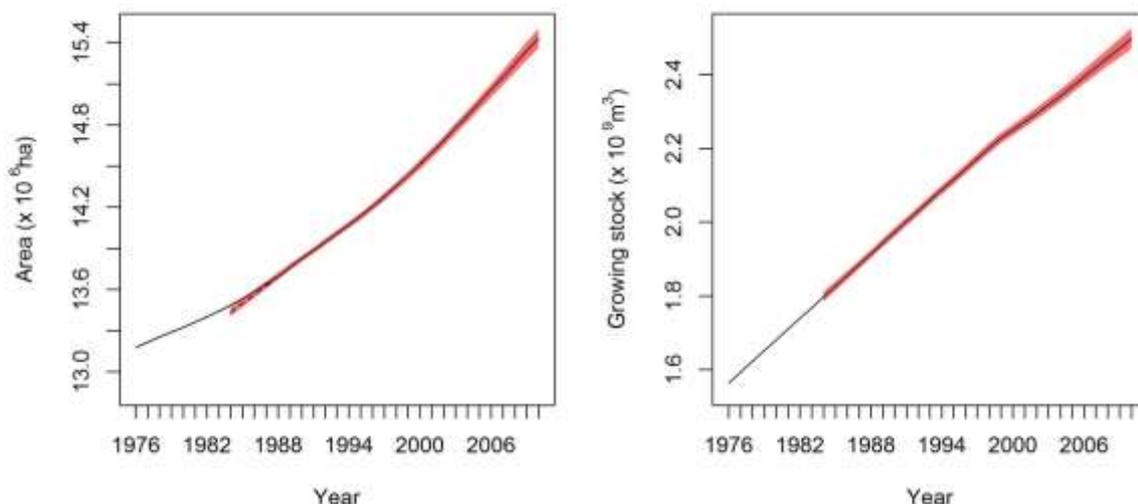


Fig.1 Absolute changes in forest area and volume of the growing stock in French forests. Volumes are defined at a cross-sectional diameter of 7 cm for production forests. The 95% bilateral confidence intervals were established from 10,000 bootstrap samples in the errors of national forest inventory estimates and are represented in grey. The dashed line (area) represents the interpolated chronology restricted to data enabling the bilateral confidence interval calculation

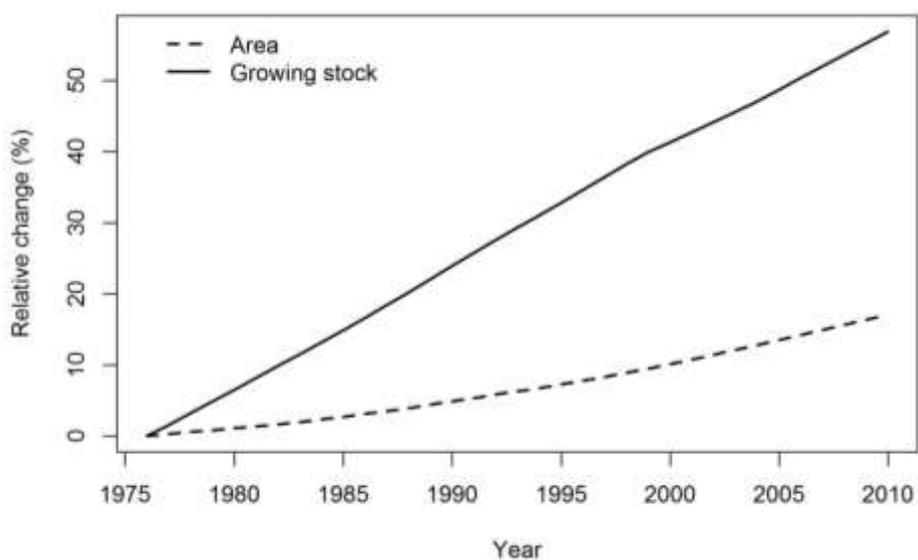
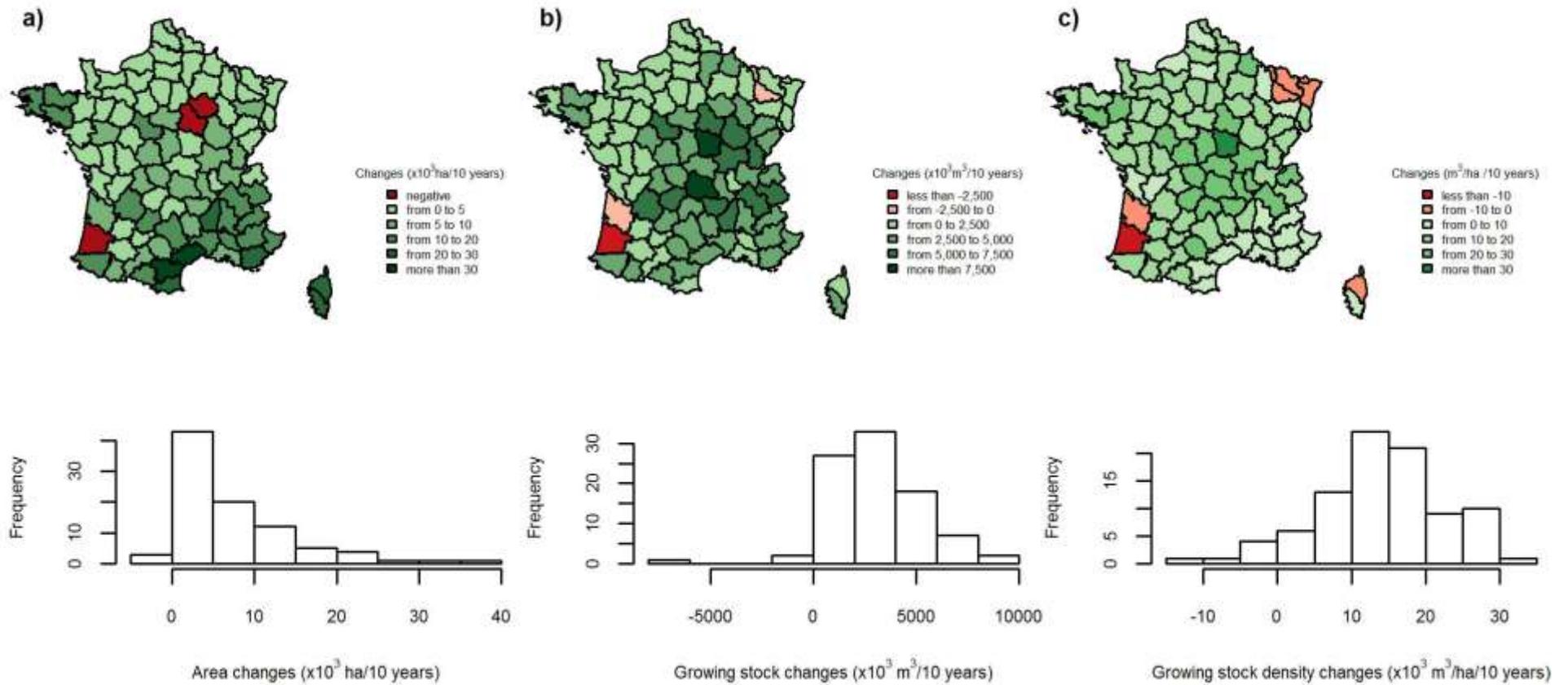


Fig.2 Relative changes in forest area and volume of the growing stock for French forests. Inventories in department administrative units were temporally interpolated and aggregated over the whole territory

Maps revealed strong spatially-structured heterogeneities in the forest expansion (**Fig3**), which differed between area and GS and, therefore, indicated spatial separation between forest area extension and GS densification processes. The expansion area was greater in Southern and Northwestern France ('Brittany'), followed by the central mountain

range. In comparison, the greatest increases in GS and GSD occurred in the central mountain range and central North ('Burgundy', **Fig3**), suggesting historical changes in the geography of forest area expansion.

III - Caractérisation de l'expansion des forêts françaises



1

2 **Fig.3** Spatial variations in decennial changes in a) area, b) volume of the growing stock, and c) growing stock density in French forests,
 3 estimated by department administrative unit between 1976 and 2010. Lower graphs: cross-*dau* distribution of these changes

4 3.1.2. Forest changes across ownership strata

5 Ownership categories strongly structured the magnitude of expansion, in accordance
6 with their prevalence over the territory (**Table 2**). Private forests showed the greatest
7 absolute increases in area and growing stock (+1 800 Mha and +770 hm³). State's forests
8 with a historical tradition of management, showed the smallest forest changes (+80 Mha
9 and +20 hm³) (**Table 2; Fig4**). OPF occupied an intermediate position. Private forests also
10 showed a greater increase in GSD than OPF, from 104 to 155 m³/ha (**Table 2; Fig5**). The
11 GSD of State's forests, which was greater than that in other ownership categories (above
12 180 m³/ha), remained almost constant. From a spatial perspective, private forests showed
13 positive changes in area, GS, and GSD for almost all *dau*, highlighting a widespread
14 expansion in this ownership category (**FigS2**). In contrast, State's forests, and to a lesser
15 extent OPF, frequently exhibited negative variations in these attributes. The t-tests showed
16 that changes in forest area, GS, and GSD were much more significant in private forests and
17 OPF than in State's forests ($p < 10^{-13}$ for private forests, $p < 10^{-7}$ for OPF, $p < 0.04$ for
18 State's forests).

19

Table 2 Changes in forest area, growing stock, and growing stock density across ownership categories from 1976 to 2010.

	Forest area				R	Forest growing stock				R	Growing stock density ¹		
	Initial value (x10 ⁶ ha)	Absolute change (x10 ³ ha)	Relative change (%)	Part of the total expansion (%)		Initial value (x10 ⁶ m ³)	Absolute change (x10 ⁶ m ³)	Relative change (%)	Part of the total expansion (%)		Initial value (m ³ /ha)	Absolute change (m ³ /ha)	Relative change (%)
Private forests	9.7	+1,800	+19	80	1.1	1,011	+770	+76	85	1.3	104.2	+50.4	+48.4
OPF	2.1	+380	+18	17	1.0	330	+120	+36	13	0.6	156.4	+24.3	+15.5
State's forests	1.4	+80	+6	4	0.4	252	+20	+8	2	0.1	182.7	+3.7	+2.0

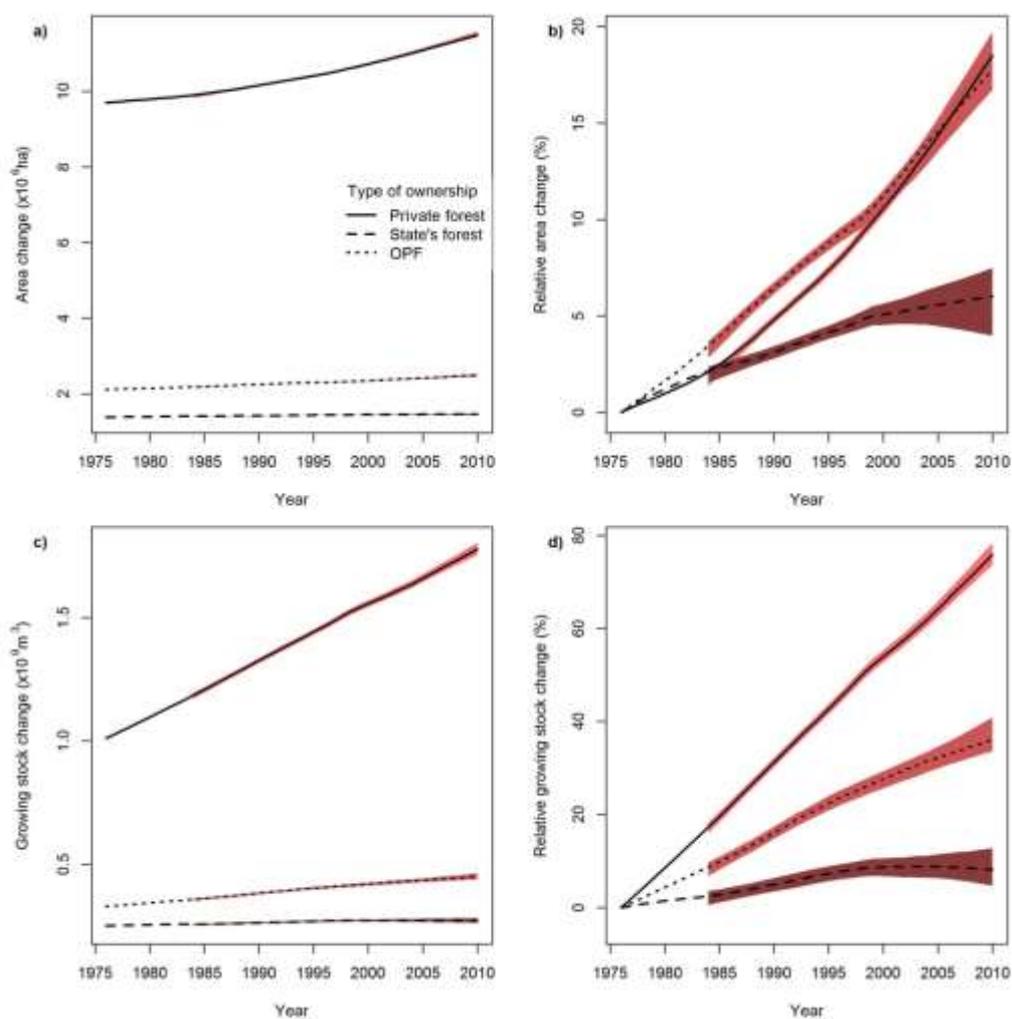
20

21

22

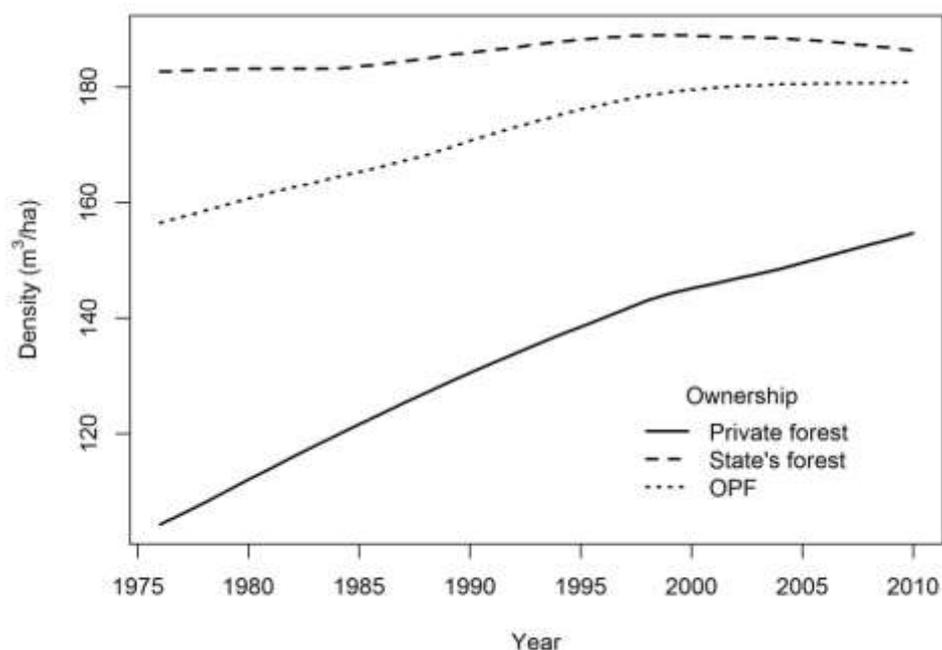
The R ratio indicates the contribution of ownership category to total expansion, with respect to their relative importance (see section 2.4). OPF refers to 'other public forests', essentially belonging to municipalities, and subjected to a legal management plan. ¹ part of the total expansion and R ratio apply to extensive variables and are meaningless for growing stock density.

23



24

25 **Fig.4** Absolute and relative changes in forest area (a and b) and growing stocks of
 26 forests (c and d) across ownership strata from 1976 to 2010. Relative changes are
 27 expressed as percentages of 1976 estimates. OPF refers to ‘other public forests’
 28 subjected to a legal management plan. The 95% bilateral confidence intervals were
 29 established from 10,000 bootstrap samples in the errors of the national forest inventory
 30 estimates and are represented in grey



31

32 **Fig.5** Changes in growing stock density of forests across ownership categories from
 33 1976 to 2010. OPF refers to 'other public forests' subjected to a legal management plan

34 Private forests and OPF showed the same relative changes in area (+19% for private
 35 forests and +18% for OPF). Noticeably, the relative increase in GS was four-fold greater
 36 than that in area in private forests, and two-fold that of the area in OPF (they were of a
 37 similar magnitude in State's forests; **Table 2**), highlighting the intensity of forest
 38 densification in current GS expansion of these strata, and especially in private forests. In
 39 this order, private forests, OPF, and State's forests showed changes of decreasing relative
 40 magnitude and contribution to total expansion (R ratios) in area and GS (**Table 2**).
 41 Furthermore, private forests were the only forests that exhibited a greater contribution to
 42 total GS expansion (85%, R = 1.3) than to areal expansion (80%, R = 1.1). State's forests
 43 showed relative changes in area and GS, below 10%, and R ratios of 0.4 and 0.1,
 44 respectively. This result confirmed their insignificant role in expansion. In comparison,
 45 private forests represented 63% of French forest GS in 1976, and now represent 71% of the
 46 current GS.

47 3.1.3. Forest changes across ownership x composition strata (1987–1994)

48 Despite the restricted study period, t-tests showed that changes to forest area were
 49 positive and significant for all independent ownership x composition strata ($p < 0.05$;
 50 **Table S2**) except for two public ownership strata: State's coniferous and OPF broadleaved
 51 forests. Changes to GS and GSD were significant in all strata except for State's
 52 broadleaved forests. Private broadleaved forests that formed the largest stratum (6.6 Mha)

53 showed an substantial areal increase of around 230,000 ha over the period ($p = 10^{-4}$), and
54 presented the greatest relative increase (+3.4%) and expansion intensity ($R = 1.3$) among
55 strata (**Table 3**). Only coniferous OPF exhibited a similar intensity in areal expansion;
56 however, this was negligible in absolute terms (+24,000 ha). Private broadleaved and
57 coniferous forests also showed the greatest relative increases in GS (both greater than 10%)
58 and intensities of expansion, greater than the unity ($R = 1.2$) in these two strata only. The
59 great intensities of areal and GS expansion found in private broadleaved forests made it the
60 dominating stratum in French forest expansion and stresses the role of natural colonization
61 of broadleaves and the low-intensity of forest management in this stratum. In 1987, GSD
62 was greatest in coniferous OPF ($209.8 \text{ m}^3/\text{ha}$) and lowest in broadleaved private forests
63 ($118.5 \text{ m}^3/\text{ha}$). The smallest increases of GSD occurred in State's forests, particularly
64 broadleaved forests ($+0.8 \text{ m}^3/\text{ha}$). The greatest increases were found in private forests
65 (especially in coniferous forests; $+17.4 \text{ m}^3/\text{ha}$ in coniferous and $+10.6 \text{ m}^3/\text{ha}$ in broadleaved
66 forests) and broadleaved OPF ($+11.0 \text{ m}^3/\text{ha}$, **Table 3**).

67 Noticeably, private forests represented more than 80% of the total expansion in both
68 area and GS (**Table 3**); however, the contribution of private broadleaved forests was greater
69 for area (66%) than for GS expansion (50%). Together with a restricted contribution of
70 coniferous forests to areal increases (15%, $R = 0.6$), this result indicated that private
71 coniferous forests were at a later phase of expansion than private broadleaved forests. This
72 highlighted a temporal shift in the dominance of these compositions, from coniferous to
73 broadleaved, in areal forest expansion.

III - Caractérisation de l'expansion des forêts françaises

74 **Table 3** Changes in forest area, growing stock, and growing stock density with respect to ownership categories and composition of tree
75 species between 1987 and 1994.

ownership	Species composition	Area					Growing stock					Growing stock density ¹		
		Initial value (x10 ⁶ ha)	Absolute change (x10 ³ ha)	Relative change (%)	Part of the total expansion (%)	R	Initial value (x10 ⁶ m ³)	Absolute change (x10 ⁶ m ³)	Relative change (%)	Part of the total expansion (%)	R	Initial value (m ³ /ha)	Absolute change (m ³ /ha)	Relative change (%)
Private forests	Broadleaved	6.6	+228	+3.4	66.3	1.3	784	+99	+12.7	49.9	1.2	118.5	+10.6	+8.9
	Coniferous	3.0	+50	+1.6	14.5	0.6	461	+61	+13.2	30.6	1.2	152.9	+17.4	+11.4
OPF	Broadleaved	1.4	+25	+1.8	7.4	0.7	217	+20	+9.2	10.0	0.9	150.6	+11.0	+7.3
	Coniferous	0.7	+24	+3.3	6.9	1.3	151	+11	+7.3	5.5	0.7	209.8	+8.1	+3.9
State's forests	Broadleaved	0.9	+15	+1.7	4.3	0.6	161	+3	+2.1	1.7	0.2	185.2	+0.8	+0.4
	Coniferous	0.5	+2	+0.4	0.6	0.2	96	+4	+4.7	2.2	0.4	191.6	+8.1	+4.2

76 The R ratio indicates the contribution of ownership category to total expansion, with respect to their relative importance (see section 2.4). OPF refers to 'other public forests',
77 essentially belonging to municipalities, and subjected to a legal management plan. ¹ part of the total expansion and R ratio apply to extensive variables and are meaningless for
78 growing stock density.

3.2. Temporal changes in the rates of area, GS, and GSD change (objective 2)

Tests performed across *dau* units at a country scale did not present any significant change in the rate of areal and GS expansion ($p = 0.1$ for area and GS; **Table 4**) or for GSD ($p = 0,07$), despite existing positive trends ($+2,500 \text{ ha}/10 \text{ years}/dau$, $+430,000 \text{ hm}^3/10 \text{ years}/dau$, and $+3.0 \text{ m}^3/\text{ha}/10 \text{ years}/dau$) This indicated a steady pace in forest expansion, and no sign of decline in the expansion rates was identified. Interestingly, the cross-*dau* correlation in the expansion rates of the two successive periods was null for forest area (0.02 ; $p = 0.8$), weak for GSD (0.21 ; $p = 0.06$), and highly significant for GS (0.53 ; $p < 10^{-7}$; **Fig6**). This provided evidence for temporal inertia in the spatial structure of GS changes, but not of area (the intermediate level of inertia for GSD resulting from the two former). Spatial heterogeneity in these changes was also found, including positive TCRC in forest areas across the Western and Southern *dau* of France (**FigS3**), in accordance with the geography of forest extension (**Fig3**). Those in the growing stock were spread across the entire territory, except for Northeastern and Southwestern France. Negative values for TCRC of GSD were also found in Southwestern France.

Ownership-oriented analyses (**Table 4**) revealed temporal accelerations in both the forest area ($p = 0.03$) and GS ($p < 10^{-3}$) expansions in private forests. Significant decelerations in GS expansion were found in State's forests and OPF ($p < 0.05$ for State's forests and $p < 10^{-3}$ for OPF), suggesting either early biological saturation of GS, or a felling intensification over time. The absence of significant temporal change in the forest expansion at the country level, therefore, resulted from opposed ownership-structured trends. No ownership category presented a significant TCRC in GSD. Spatial patterns in TCRC by ownership category are presented in **FigS4**.

Ownership x composition-oriented analyses showed an inversion from increase to decrease in the areal RC for coniferous private forests, while we observed a significant acceleration for the entire private forest area (**Table 4**). Since forests without composition information were discarded from this analysis (see section 2.3), this suggested an acceleration in the expansion of these forests, which increased by 250,000 ha between 1987 and 1994 (11% of total private forest expansion). Along with non-significant changes in the areal RC of private broadleaved forests, a strong acceleration in GS change was found ($p < 10^{-6}$), indicating an accelerated densification of these forests. The TCRC of GSD was found to be significant and positive only in OPF ($p = 0.03$ for broadleaved forests and $p < 10^{-5}$ for coniferous ones).

In summary, changes in forest area and GS did not reveal any temporal slowing or saturation, even though contrasting patterns across space and ownership were detected (**FigS3 and FigS4**). Forest GS showed significant temporal inertia. RC increases were identified in both the area and GS of private forests, and in the GS of private broadleaved forests, indicating that these strata were affected by an open, unconstrained forest dynamic. The

steady pace of forest expansion on a country-wide scale also results from contrasted forest dynamics across strata.

Table 4 Mean differences in the rates of change (TCRC) of forest area, growing stock, and growing stock density between two successive subperiods of 1976–2010.

Partitioning	Stratum	Mean difference (TCRC) ^a (sign of RC ₁ and RC ₂)		
		Area (ha/10 years)	Growing stock (m ³ /10 years)	Growing stock density (m ³ /ha/10 years)
none	countrywide forests	2,500 (++)	430,000 (++)	3.0 ^(*) (++)
by ownership	Private forests	3,200 *	790,000 ***	3.3 ^(*)
		(++)	(++)	(++)
	OPF	600 ^(*)	-610,000 ***	3.8
		(++)	(++)	(++)
State's forests	300	-140,000 *	1.4	
	(+-)	(--)	(-)	
by composition x ownership	Broadleaved private forests	-2,100	1,100,000 ***	-5.4
		(++)	(++)	(++)
	Coniferous private forests	-5,500 ***	-880,000 ***	0.86
		(+-)	(++)	(++)
	Broadleaved OPF	-1,800 **	-1,140,000 ***	12.4*
		(++)	(+-)	(++)
	Coniferous OPF	-400	-240,000	37.1***
		(--)	(+-)	(-)
	Broadleaved State's forests	800 *	-120,000*	-7.2 ^(*)
		(++)	(+-)	(+-)
Coniferous State's forests	-400 *	-60,000	-4.4	
	(--)	(--)	(+-)	

^a See Eq. 2 and 3, and section 2.5. Weights equal to the initial area for area or the initial growing stock for growing stock and growing stock density were used. Because of the change in the definition of a forest, M2 was discarded from the areal analysis. The two periods were separated by the year 1985 for area (or 1990 for the study of composition) and 1990 (or 1997) for GS. RC₁ and RC₂ correspond to the rate of change of the first and the second period, respectively. Paired t-tests associated with the different strata of a given partitioning level are independent. Significance of the paired t-test: p < 0.1: (*), p < 0.05: *, p < 0.01: **, p < 0.001: ***. OPF refers to 'other public forests', essentially belonging to municipalities, and subjected to a legal management plan.

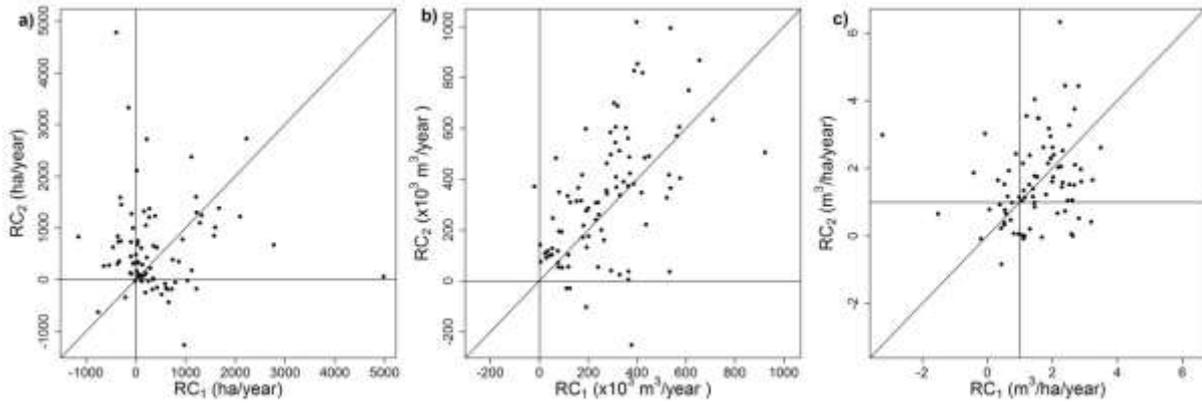


Fig.6 Cross-dau relationships between the rates of change in two successive subperiods between 1976 and 2010 (RC_1 and RC_2) for a) forest area, b) volume of the growing stock, and c) growing stock density. The separation year is 1985 for forest area and GSD, and 1990 for GS (see section 2.5). The black line represents the identity function where $RC_2 = RC_1$

Complementary analyses (**Material S3** and **Table S1**) based on the comparison of periods 2006-2014 and 1976-2010 showed a country-scale progression in the rates of change of area and GS, found greatest in private forests, again suggesting that ongoing forest expansion is not saturating and stressing the major role played by private forests. Increases in areal and GS rates of change were mostly found greatest in broadleaved forests. No such changes were identified in coniferous forests.

3.3. Proximal drivers of GS variations (objective 3)

Variation in GS changes accounted for by the different models ranged between 8% and 71%, depending on the stratum under study (**Table 5**). In general, model goodness-of-fit increased with the finer partitioning of forests (none, ownership, ownership x composition), indicating that the partitioning factors were efficient for isolating strata of increasing dynamic homogeneity. Goodness-of-fit was also greater in strata showing expansions of greater magnitudes (see **Tables 2 and 3**).

The effect of the initial GS was systematically positive when detected but was not found in some strata, including State's forests affected by small changes in the growing stock (**Table 2** and **Table 3**). The positive effect of increases in the forested area over the previous BIP was found in all ownership x composition strata but in private forest strata, highlighting the delayed effect of increased forest area on growing stock, even over restricted time periods. Unexpectedly, a negative effect of the GSD, assumed to represent the competitive slowing of growing stock expansion, was found in the strata affected by GS acceleration over the study period (countrywide forests, private forests, and private x broadleaved forests, **Table 4**). However, this effect generally had a much lower statistical intensity on GS changes than the initial GS, as indicated by semi-partial r^2 . To clarify this conflicting outcome and to evaluate

whether the negative effect of GSD was of recent significance, we fitted models M2 (private forests) and M5 (private broadleaved forests) to data subsets, including only the first and last periods available. Of note, in M5, the intensity of the GSD effect was greater in the latter period (semi-partial r^2 of 0.13; **Table S4**) than in the former period (semi-partial r^2 of 0.07), suggesting that a recent downregulation of changes in GS by GSD arose in the expanding strata over the period.

Models including increases in forest area over the two previous BIP explained 14–81% of variation in GS changes (**Table S5**). Previous areal increases in ΔS_{-2} were significant in most models. However, these models were fitted on less BIP than models including only ΔS_{-1} .

Table 5 Summary statistics for the regression models of changes in the growing stock per *dau* against forest attributes across ownership and composition strata of the forests.

Model	Partition	Time span of studied between- inventory periods	R ²	GS _i (coefficient sign) Semi-partial r ²	GSD _i (coefficient sign) Semi-partial r ²	ΔS_{-1} (coefficient sign) Semi-partial r ²	RSE (m ³)
M1	None		0.35	(+) ^{***} 0.18	(-) ^{**} 0.03	(+) [*] 0.00	594
M2	Private forests	(1961)-1976-2010	0.55	(+) ^{***} 0.37	(-) ^{**} 0.02	(+) [*] 0.00	499
M3	OPF		0.26	(+) ^{***} 0.10		(+) ^{***} 0.00	375
M4	State's forests		0.08			(+) ^{***} 0.04	292
M5	Broadleaved private forests		0.54	(+) ^{***} 0.39	(-) [*] 0.03		455
M6	Coniferous private forests		0.71	(+) ^{***} 0.16	(-) [*] 0.00		525
M7	Broadleaved OPF	(1971)-1987-2010	0.35	(+) ^{**} 0.00		(+) ^{***} 0.09	397
M8	Coniferous OPF		0.36	(+) [*] 0.03		(+) ^{***} 0.05	372
M9	Broadleaved State's forests		0.22			(+) ^{***} 0.05	226
M10	Coniferous State's forests		0.34			(+) ^{***} 0.21	301

The timespan indicates the year of the first available inventory (in parentheses), the year when 80% of *dau* were available, and the year of the last inventory (for which all *dau* were available). GS_i : initial growing stock, GSD_i : initial mean growing stock density, ΔS_{-1} : forest area increases over the previous between-inventory periods. RSE: residual standard error. Test significance: $p < 0.05$: *, $p < 0.01$: **, $p < 0.001$: ***. OPF refers to 'other public forests', essentially belonging to municipalities, and subjected to a legal management plan. Relationships between changes in the growing stock and partial predictions are plotted in FigS5 and FigS6.

4. Discussion

4.1. Patterns and magnitude of forest expansion at the country scale and across ownership and species composition (objective 1)

4.1.1 Country-scale forest changes

GS increased by 906 hm³ between 1976 and 2010, with a relative magnitude of nearly +60% (**Fig1 and Fig2**). These wood resources accumulated in France over 35 years, and are quantitatively equivalent to the current total GS of other European countries, including Spain, Norway, or Turkey (944, 1,033, and 1,032 hm³, respectively) (Forest Europe 2015), and stress the intensity of this expansion. This increased stock represents an opportunity for the current European bio-economy strategy, and further constitutes an additional carbon sink in terms of climate change mitigation, making its future dynamics a crucial issue.

Relative temporal changes were three-fold greater for GS than for forest area (**Fig2**) and highlighted the strength of current forest densification in a context where the forest areal increase was already intense. GSD increased by 32% on average, in accordance with the increase in biomass carbon stocks per hectare observed in previous studies (Ciais et al. 2008; Dupouey et al. 2010). Altogether, these results confirm that French forests are at an already advanced stage of forest expansion, arising from ancient areal expansion (Cinotti 1996). For example, forests in Vietnam recently presented an increase in area, along with a decrease in GSD (Kauppi et al. 2006; FAO 2015). This pattern corresponds to a previous stage of forest expansion, where an increase in the forest area first contributes to a decrease in average GSD. In addition, because French forest area continued to increase over the study period (+17%), and the average GSD remains lower than that of other neighbor European countries (168.3 m³/ha compared with e.g. 320.8 m³/ha in Germany) (Forest Europe 2015), GS expansion is bound to be maintained, at least over subsequent decades. Therefore, it is likely that changes in growing stock after forest transition may last for over a few centuries (minimum forest areas were observed before 1850; Cinotti 1996), and are largely out of scope of the standard time horizon of forest policies.

Forest transition and expansion were initially defined and assessed on a country scale (Mather 1992; Mather et al. 1999). Our results clearly demonstrate the large spatial heterogeneity in these changes (**Fig3**), in line with observations carried out in other countries (Switzerland in Loran et al. 2016; Norway in Fjellstad and Dramstad 1999; USA with a longitudinal E-W gradient in Kauppi et al. 2006). In addition, spatial patterns in areal and GS expansion considerably differed in our study area (**Fig3**). Assuming that current GS expansion arises from previous areal expansion to a large extent (an assumption tested in GS models, see 4.3), this issue stresses the temporal irregularity of areal expansion patterns, confirmed by the analysis across subperiods (**Fig6**, see 4.2). In this respect, the mechanisms through which a spatially heterogeneous and temporally non-stationary areal expansion leads

to smooth forest expansion trajectories at a higher scale (**Fig1**) remains unclear and require elucidation.

These spatial patterns also fit historical facts well. Southern France (**Fig3a**) has been subjected to significant farmland abandonment (Chakir and Madignier 2006). The reported areal expansion in this part of France footprints this process (**Fig3**). Moreover, the intensity of management of these forests is often low, due to their lower productivity and accessibility, and fragmentation of ownership (de Galbert 2015), contributing to an increasing GS in Mediterranean forests. Between 1946 and 1999 the “Fonds Forestier National” plantation program resulted in an increase in forest area of *ca* 800 000 ha (Dodane 2009). This afforestation was not homogeneous over the whole country and some targeted areas were privileged (including the central mountain range) (Dodane 2009). This process accounts for the expansion of the area and growing stock observed in the central mountain range and Burgundy (central France; **Fig3**). Decreases in the growing stock recorded in three *dau* (**Fig3b**) were related to severe windstorms in 1999 and 2009, which affected 176 (Ministère de l'agriculture 2005) and 43 hm³ (IFN 2009) of land, respectively. The impacts of the storms were greater in the South-West and the North-East, where the three *dau* were located. Between 1910 and 1970, area expansion was greater in the central mountain range (Normandin 1979, Denardou et al. 2018) than in the rest of the country. Densification of these new forests was subsequently observed, as illustrated in **Fig3c**.

4.1.2 Forest changes across ownership strata

Over the study period, forest area expanded more on private lands (+1,800 Mha; **Table 2**) than in any other ownership category, but with a similar rate to that observed for OPF (+19% for private forests and +18% for OPF). Of note, private forests contributed more to areal expansion ($R = 1.1$; **Table 2**) than the OPF and State's forests ($R = 1.0$ for OPF and 0.4 for State's forests). This indicates an open-forest colonization dynamic, whereas the classification of new OPFs expanding on municipality agricultural land also depends on legal recognition processes. Also, State's forests, that are those most closely submitted to forest management plans, contributed very little to forest expansion, and, as such, do not form a primary target of current challenges associated with forest expansion, including the fostering of wood resource use. This trend in the expansion of private forests was also observed between 1910 and 1970 (Normandin 1979), with four-fifths of the total expansion located in private forests, a similar proportion to that observed between 1976 and 2010. This major increase in the area of private forests (**Table 2**; **Fig4**) is related to agricultural land abandonment and subsequent afforestation, either natural or by plantations (Chakir and Madignier 2006), a long-term process observed throughout Europe (Lasanta et al. 2017; Keenleyside and Tucker 2010). Similarly, between 1990 and 2010, the area of public forests in Germany decreased by 55,000 ha, while private forests increased by 870,000 ha (FAO 2015). In Italy, the relative

increase in public and private forest area was comparable (+19%) between 1990 and 2010 (Forest Europe 2015).

GS expansion was also strongly ownership-structured, with private forests, again, showing the most intensive expansion (**Table 2**), which was four-times greater than in area (+80%), and more than proportional to the initial growing stock ($R = 1.3$). This extrapolates to a singular doubling in these forests' GS in less than 50 years (42.5 years).

In addition to past areal expansion, forest management might have caused this singularity, as suggested by GSD indicators (**Table 2, Fig5**). First, GSD was lowest in private forests at the beginning of the study period. This modest level of 100 m³/ha indicates that private forests had lower stocking densities than State's forests (180 m³/ha), in which the conversion of stands to high forests has been fostered over a long time-frame through forest planning (Hüffel 1927). In contrast, coppice and coppice-with-standard forest production systems have remained more frequent in private forests, particularly for energy wood production (Hüffel 1927). Accordingly, current NFI statistics (2006–2012 period) indicate that the prevalence of such low-stocked systems remains much greater in private forests than in other forest types (43% of the forest area in private forests versus 31% in OPF and only 20% in State's forests). Since the GSD in private forests presented the fastest increase over the study period (+50%), this implies that these low-stocked forests have been little harvested in previous decades. Low-intensity harvesting is more likely to have occurred in returning forests over abandoned agricultural areas, which stresses the deficit of any strategic planning in these forest compartments. Differences in the GSD across ownership categories tends to narrow (**Fig5**), confirming the observation of Pignard (2000). A full understanding of causal forest management processes of this expansion would require further explorations, e.g. based on diameter-structured GS budgets and growth/harvest flux balance across ownership categories.

4.1.3 Forest changes across ownership x composition strata

Analyses of ownership x composition categories demonstrated that private broadleaved forests represented most of the absolute forest expansion (two-thirds of the area, 50% of GS, **Table 3**). Whereas the intensity of GS expansion was the same in coniferous and broadleaved forests ($R = 1.2$), it was twice greater for the areal expansion in broadleaved than in coniferous forests ($R = 1.3$ and 0.6 , respectively). This finding may indicate the dominance of natural afforestation by broadleaved species, in less fertile zones, versus active afforestation using coniferous species, in more favorable ecological conditions. Accordingly, FFN afforestation was essentially implemented before the 1987–1994 period, and mostly used coniferous species. However, natural colonization by coniferous species (such as *Pinus*) also occurs (Lepart et al. 2001). Contrary to our expectation, the relative expansion and intensity in GS of coniferous and broadleaved private forests (**Table 3**) were comparable. Statistics on forest structure indicate that coppice and coppice-with-standard production systems actually

dominate private broadleaved forests (60% of the area over 2006–2012), yet represent only 10% of coniferous forests. This ratio likely explains the moderate level of growing stock of private broadleaved forests (118.5 m³/ha for broadleaved forests compared with 152.9 m³/ha for coniferous forests). Thus, the natural aging of these broadleaved production systems might counterbalance GS expansion resulting from active coniferous afforestation programs. Again, causal studies exploring diameter-structured GS budgets are here required. These results clearly demonstrate the significance of passive and uncontrolled forest expansion, even if the outcome of post-war afforestation programs can also be clearly observed in GS changes, such as in the central mountain range.

4.2. Temporal changes in the rate of change in forest area, GS, and GSD (objective 2)

On the country scale, there was no difference in the rate of change of forest area and GS between successive time periods (**Table 4**), which presented a positive TCRC. Consequently, French forests have been accumulating carbon in stem wood since 1990 at the same high pace as they did previously (Dupouey et al. 2010), and even faster, as opposed to that suggested for European forests (Nabuurs et al. 2013). The accelerated GS accumulation was particularly intense in private and private broadleaved forests (**Table 4**), stressing the role of forest development in this ownership category. In private forests, an accelerating trend in forest area was also observed. Because this extension has a delayed, but positive, contribution to forest GS (see 4.3), the GS expansion of French forests will be maintained over the coming decades, at least.

The null cross-*dau* correlation between the expansion rates of the two periods for area (**Fig6**) revealed that no temporal inertia can be expected in forest area changes, even over a small time span. Drivers of forest area expansion are those typical of land-use change, including economic, sociological, and policy influences (Mather et al. 1999). As such, these changes are subjected to short-term variations. Yet, the depicted course of forest area remained smooth on the higher scale (**Fig1**). Inertia was much greater for changes in the GS, which is consistent with standard demographic processes in tree population growth. Of note, the initial growing stock and the afforested area of *dau* in the previous period contributed positively in the models of GS change fitted for the between-inventory periods (**Table 5**), both contributing to a steady GS expansion over several decades.

For the most recent period, 2006–2014, no deceleration in forest area or GS expansion was observed in comparison with the longest period available, 1976–2010 (**Table S1**), corroborating our above results. However, the recent saturation in OPF area was detected.

4.3. Proximal drivers of variation in GS (objective 3)

Models of GS change across between-inventory periods of the different forest strata confirmed the hypotheses initially considered (**Table 5**). First, the initial GS had a positive effect on GS change, except for strata of stable GS (**Table 2** and **Table 3**), interpreted as a

capital-production effect (Berryman 1992). Second, the increase in forest area over the previous between-inventory period also had a positive effect on GS variation, except in broadleaved or coniferous private forests, and reflected the delayed development of the growing stock in the associated area. The absence of this effect in private forests was not expected in this stratum where areal increases were observed (see 3.1, **Table 2**). However, this effect was significant in models fitted on the whole private strata, despite being of very moderate intensity. This result also demonstrates the limited ability to interpret such demographic process models when fitted on large strata. The presence of this effect in public forests might reflect: i) more intense management leading to the faster growth of new forests, or ii) changes of the types of ownership of existing forests (essentially private forests to OPF) that may also limit this effect in the associated private forests. While this delayed effect of areal expansion certainly contributes to GS over periods exceeding the typical study-BIP (12 years on average), the definition of forests in the NFI method M1 (see 2.2 and **material S1**) is such that new forested areas were identified as soon as an existing growing stock was close to detection. This approach contrasted with the more recent international definition of forests applied in method M2 (see 2.2) (FAO 2004). Furthermore, models including the two previous between-inventory periods explained a larger part of GS variation, but were fitted on a smaller dataset (**Table S5**). This confirmed the longer-term effect of previous area increases on GS changes.

Third, the negative effect of growing stock density might reflect a density-dependent saturation process (competition). Surprisingly, the negative effect of GSD (Table 5) was identified at a country scale, as well as in the strata showing the greatest increases in the growing stock and an acceleration in increase over the whole study period (Tables 2, 3 and 4), namely private and private broadleaved forests. Analysis of the significance of this effect on subsets defined by the first and final study periods available in the whole dataset revealed a stronger intensity of this effect of GSD over the most recent period (see 3.3). This result supports the recent emergence of a competition-driven footprint on increases in growing stock. Nevertheless, among all predictor variables, the initial GS had the greatest intensity on variation in GS (Table 5), in accordance with the acceleration of GS expansion in these forests. As a latter test, we also computed the cross-geographical units (dau) correlation between initial GSD of the study period and R ratios (without any partitioning of forests). Accordingly, we found a negative correlation (-0.6) between them, suggesting lower expansion intensity in dau of greater GSD. A graphical analysis (FigS7) however showed that the magnitude of this correlation relied on a few spatial units (when the 10 extreme dau GSD were removed, the correlation was -0.4; $p < 10^{-4}$). This confirm our analysis that early signs of expansion by downregulation (Table 5) can be found in extreme situations but are currently not sufficient to reduce current expansion (Table 4 and Table S1).

In private forests, explained variation in GS amounted to 55%, versus 26 and 8% for OPF and State's forests, respectively. Thus, there was a clear relationship between model accuracy and the magnitude of expansion. Furthermore, our model explained 71% of the variation in the GS of coniferous private forests, but only 54% of that in broadleaved private forests. In France, a large fraction of coniferous private forests originated from plantations set up in the mid-20th century and are quite homogeneous in terms of processes and much more synchronous. In broadleaved forests, more natural processes, occurring over a longer-term and resulting from abandonment likely contribute to heterogeneity among inventory periods under study, making associated statistical effects more difficult to capture.

5. Conclusions

The expansion of forests in France was three-fold greater in GS than in area and stressed the domination of forest densification over its areal extension. This implies that large-scale forest management intensity is far below its current potential, letting room for forest maturation. In private forests not subjected to a legally-binding management plan, low initial levels of growing stock density together with their fast temporal progression confirmed the role of extensive forest management in this expansion.

GS and GSD expansions demonstrated the already advanced stage of these forests in the course of forest transition, initiated in the early 19th century in France. Yet, both i) steady or accelerating trends in GS and in forest area increases (as a future contribution to GS), ii) strong positive dependence of GS expansion onto the initial GS, iii) low levels of GSD and only discrete and recent signs of future GSD-related limitation all indicate that this expansion will be maintained in future decades at least, making these forests a long-lasting carbon sink. The magnitude of expansion, together with the moderate forest cover (one-third of the territory), suggest that the asymptotic time horizon of this expansion is very distant.

The importance of investigations of forest expansion, across distinct forest compartments and at scales finer than country-scale, was also demonstrated. They highlighted important heterogeneities with respect to space, ownership, and composition. Spatial structures revealed a land-abandonment footprint in Southern and Northwestern France and maturation of plantations in the central mountain range. Private forests showed the most intensive expansion, even accelerating, with respect to both area and GS. The primary role of broadleaved private forests was also demonstrated, arising from the natural colonization of abandoned agricultural lands by broadleaved species. Whereas the footprint of past afforestation programs was discernible in the forest expansion, our results suggest that the expansion remains largely natural and uncontrolled, and can dominate over active plantation policies.

Since NFI exist in most countries, and the methods presently used are of generic nature, this research would find thorough application on other country's forests, and has the potential

to deliver invaluable insight onto the dynamics of forests at broader and up to continental scales

References

- Abadie J, Dupouey JL, Avon C, Rochel X, Taton T, Bergès L (2017) Forest recovery since 1860 in a Mediterranean region: drivers and implications for land use and land cover spatial distribution. *Landsc Ecol* 33 (2):289-305.
- Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, Kitzberger T, Rigling A, Breshears D, Hogg EH, Gonzalez P, Fensham R, Zhang Z, Castro J, Demidova N, Lim JH, Allard G, Running SW, Semerci A, Cobb N (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For Ecol Manage* 259 (4):660-684.
- Berryman AA (1992) The origins and evolution of predator-prey theory. *Eco* 73 (5):1530-1535.
- Boisvenue C, Running S (2006) Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20th century. *Glob Chang Boil* 12 (5):862-882. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x>
- Bontemps JD, Hervé JC, Leban JM, Dhôte JF (2011) Nitrogen footprint in a long-term observation of forest growth over the twentieth century. *Trees* 25 (2):237-251.
- Brad Smith W, Miles PD, Vissage JS, Pugh SA (2004) Forest resources of the United States, 2002, General Technical Report NC-241; North Central Research Station, St. Paul, United-States; 137p. <https://doi.org/10.2737/NC-GTR-241>
- Chakir R, Madignier AC (2006) Analyse des changements d'occupation des sols en France entre 1992 et 2003. *Economie rurale* 296:59-68. <https://doi.org/10.4000/economierurale.1920>.
- Charru M, Seynave I, Herve JC, Bertrand R, Bontemps JD (2017) Recent growth changes in Western European forests are driven by climate warming and structured across tree species climatic habitats. *Ann For Sci* 74 (33):34p. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0626-1>
- Ciais P, Schelhaas MJ, Zaehle S, Piao SL, Cescatti A, Liski J, Luyssaert S, Le-Maire G, Bouriaud O, Freibauer A, Valentini R, Nabuurs GJ (2008) Carbon accumulation in European forests. *Nature geoscience* 1:425-429. <https://doi.org/10.1038/ngeo233>
- Cinotti B (1996) Evolution des surfaces boisées en France: proposition de reconstitution depuis le début du XIXe siècle. *Revue Forestière Française* 48 (6):547-562. <https://doi.org/10.4267/2042/26776>.
- Daubree L (1912) *Statistique et Atlas des forêts de France*. Paris, France, 2 vol.
- Dedrick S, Spiecker H, Orazio C, Tome M (2007) Martinez, I. Plantation or conversion – The debate !; European Forest Institute : Joensuu, Finland

- Denardou A, Hervé JC, Dupouey JL, Bir J, Audinot T, Bontemps JD (2018) L'expansion séculaire des forêts françaises est dominée par l'accroissement du stock sur pied et ne sature pas dans le temps. *Revue Forestière Française* 69 (4-5):319-339.
- Dodane C (2009). Les nouvelles forêts du Massif Central: enjeux sociétaux et territoriaux. Ces hommes qui plantaient des résineux pour éviter la friche, PhD thesis, Ecole normale supérieure Lettres et Sciences Humaines - ENS Lyon
- Dupouey JL, Pignard G, Hamza N, Dhôte JF (2010) Estimating carbon stocks and fluxes in forest biomass: 2. Application to the French case based upon National Forest Inventory data. In: Loustau D (ed) *Forests, carbon cycle and climate change*. Quae, Paris, France pp. 101-129. ISBN 978-2-7592-0384-0
- Egnell G, Laudon H, Rosvall O (2011) Perspectives on the potential contribution of Swedish forests to renewable energy targets in Europe. *Forests* 2 (2):578-589. <https://doi.org/10.3390/f2020578>
- European commission (2015) Sustainable agriculture, forestry and fisheries in the bioeconomy - A challenge for Europe. 4th SCAR Foresight Exercise, 137p.
- FAO (2004) Global forest resources assessment update 2005: terms and definitions (final version). Forest Resources Assessment Programme Working Paper 83/E, FAO Forestry Department: Rome, Italy
- FAO (2015) Global forest resources assessment 2015. Rome, Italy
- Forest Europe (2015) Full State of Europe's Forests 2015. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, Madrid, Spain
- Fjellstad WJ, Dramstad WE (1999) Patterns of change in two contrasting Norwegian agricultural landscapes. *Landsc. and urban plan* 45:177-191
- de Galbert M, Magrum M, Morin GA (2015) Valorisation agricole et forestière de l'espace rural - Rapport no14064, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt/CGAAER, 165p
- Glatzel G (1999) Historic forest use and its possible implications to recently accelerated tree growth in Central Europe. In: Karjalainen T, Spiecker H, Laroussinie O (eds) *Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe*, EFI Proceedings 27, European Forest Institute, Joensuu, Finland, pp 65-74
- Henttonen H, Nöjd P, Mäkinen H (2017) Environment-induced growth changes in the Finnish forests during 1971–2010 – An analysis based on National Forest Inventory. *For. Ecol. Manage* 386 (15):22-36
- Hervé JC, Wurpillot S, Vidal C, Roman-Amat B (2014) L'inventaire des ressources forestières en France: un nouveau regard sur de nouvelles forêts. *Revue Forestière Française*, 66 (3): 247-260. <https://doi.org/10.4267/2042/56055>.
- Hervé JC (2016) France. In Vidal C, Alberdi I, Hernández L, Redmond J (eds) *National Forest Inventories*, Springer, Cham, Switzerland, pp 385-404, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44015-6>, ISBN: 978-3-319-44014-9.

- Houghton RA, Hackler JL, Lawrence KT (1999) The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. *Sci* 285 (5427):574-578.
- Hüffel G (1927) Les méthodes de l'aménagement forestier en France. *Annales de l'école nationale des eaux et forêts et de la station de recherches et expériences* 1 (2):1-230.
- IFN (1985) But et méthodes de l'inventaire forestier national. Paris, France
- IFN (2009) Tempête Klaus du 24 Janvier 2009: 234 000 hectares de forêt affectés à plus de 40% 42,5 millions de mètres cubes de dégât. *L'IF* 21:0-12
- Kahle HP, Karjalainen T, Schuck A, Ågren GI, Kellomäki S, Mellert L, Prietzel J, Rehfuss KE, Spiecker H (2008) Causes and consequences of forest growth trends in Europe – Results of the recognition project, European Forest Research Institute – Research Report n° 21. Brill: Leiden, Netherlands, Boston, United-States, Köln, Germany. ISBN: 9789004167056
- Karjalainen T, Pussinen A, Liski J, Nabuurs GJ, Eggers T, Lapveteläinen T, Kaipainen T (2003) Scenario analysis of the impacts of forest management and climate change on the European forest sector carbon budget. *For Policy and Econ* 5 (2):141-155.
- Kauppi PE, Ausubel JH, Fang J, Mather AS, Sedjo RA, Waggoner PE (2006) Returning forests analyzed with the forest identity. *PNAS* 103 (46):17574-17579. <https://doi.org/10.1073/pnas.0608343103>.
- Koerner W, Dupouey JL, Dambrine E, Benoît M (1997) Influence of past land use on the vegetation and soils of present day forest in the Vosges mountains, France. *J Ecol* 85 (3):351-358.
- Lasanta T, Arnaez J, Pascual N, Ruiz-Flano P, Errea MP, Lana-Renault N (2017) Space-time process and drivers of land abandonment in Europe. *Catena* 149 (3):810-823.
- Lepart J, Martin A, Marty P, Debain S (2001) La progression des pins sur les Causses : un phénomène difficilement contrôlable ? L'exemple du Causse Méjan. *Forêt méditerranéenne* 22 (1):23-28.
- Li P, Zhu J, Hu H, Pan Y, Birdsey R, Fang J (2016) The relative contributions of forest growth and areal expansion to forest biomass carbon. *Biogeosciences* 13:375-388. <https://doi.org/10.5194/bg-13-375-2016>
- Loran C, Ginzler C, Bürgi M (2016) Evaluating forest transition based on a multi-scale approach: forest area dynamics in Switzerland 1850–2000. *Reg Environ Chang* 16 (6):1807-1818. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0911-1>
- MacDonald D, Crabtree JR, Wiesinger G, Dax T, Stamou N, Fleury P, Gutierrez Lazpita J, Gibon A (2000) Agricultural abandonment in mountain areas of Europe: Environmental consequences and policy response. *J Environ Manage*, 59:47-69
- Mather AS (1992) The forest transition. *Area* 24 (4):367-379.
- Mather AS (2001) The transition from deforestation to reforestation in Europe. In Angelsen A, Kaimowitz, D (eds) *Agricultural Technologies and Tropical Deforestation*. CABI

- Publishing, Oxon, United Kingdom, New York, United-States, pp.35-52, ISBN: 0 85199 451 2.
- Mather AS, Fairbairn J, Needle CL (1999) The course and drivers of the forest transition: the case of France. *J of Rural Stud* 15 (1):65-90. [https://doi.org/10.1016/S0743-0167\(98\)00023-0](https://doi.org/10.1016/S0743-0167(98)00023-0)
- Meyfroidt P, Lambin F (2011) Global forest transition: prospects for an end to deforestation. *Annu Rev of Environ Resour* 36:343-371.
- Ministère de l'agriculture (2005) Indicators for the sustainable management of French forests.
- Nabuurs GJ, Lindner M, Verkerk PJ, Gunia K, Deda P, Michalak R, Grassi G (2013) First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nat clim Chang* 3:792-796. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1853>
- Normandin D (1979) Evolution de la structure des forêts françaises de 1910 à 1970. Essai d'analyse de l'évolution de la répartition des propriétés forestières privées par classes de surface. *Revue Forestière Française* 31 (3):235-252. <https://doi.org/10.4267/2042/21284>.
- Pignard G (2000) Evolution récente des forêts françaises: surface, volume sur pied, productivité. *Revue Forestière Française* 52 (sp.):27-36. <https://doi.org/10.4267/2042/5404>.
- Pourtet J (1972) L'évolution dans le choix des essences de reboisement. *Revue Forestière Française* 24 (sp.):567-575. <https://doi.org/10.4267/2042/20666>.
- Rhemtulla JM, Mladenoff DJ, Clayton MK (2009) Historical forest baselines reveal potential for continued carbon sequestration. *PNAS* 106 (15):6082-6087.
- Robert N, Vidal C, Colin A, Hervé JC, Hamza N, Cluzeau C (2010) France. In: Tomppo E, Gschwantner T, Lawrence M, McRoberts RE (eds) *National Forest Inventories*. Springer, Heidelberg, Germany, Dordrecht, Netherlands, London, United Kingdom, New York, United states, pp.207-221, <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3233-1>, ISBN 978-90-481-3232-4.
- Rudel TK, Schneider L, Uriarte M (2010) Forest transitions: An introduction. *Land Use Policy*, 27 (2):95-97.
- Schmithüsen F, Hirsch F (2010) Private forest ownership in Europe. UNECE, FAO. Geneva timber and forest study paper 26:112p.
- Strijker D (2005) Marginal lands in Europe – causes of decline. *Basic and Appl Ecol* 6 (2):99-106.
- Tomppo E, Gschwantner T, Lawrence M, McRoberts RE (2010) *National Forest Inventories*. Springer, Heidelberg, Germany, Dordrecht, Netherland, London, United Kingdom, New York, United States

4 Analyses complémentaires

4.1 Analyse de l'effet de l'interpolation et de l'extrapolation sur la lecture des tendances

4.1.1 Objectif

Dans ce chapitre, nous avons utilisé une méthode d'interpolation-extrapolation des données afin d'étudier la tendance d'expansion des surfaces et des volumes de la forêt française (Article 1, section « période d'étude »; Article 2, section 2.4). Cette méthode peut avoir un impact sur la lecture des tendances forestières, en ayant un effet lissant sur la courbe.

Nous avons donc voulu, ici, étudier cet effet et examiner son impact. Notre étude ne se base pas sur les données IFN mais sur des données théoriques, données pouvant être contrôlées.

4.1.2 Matériel et méthodes

Pour essayer de rester proche de la réalité, nous avons travaillé avec 90 individus, représentant les 90 départements IFN. Chaque individu est associé aux années d'inventaire du département qu'il représente. Comme cela a été fait dans notre étude, une seule année, 2010, représente les données NM.

Une fonction théorique d'expansion, f , est définie. Elle relie pour chaque année x , entre 1961 et 2010, une valeur correspondant dans notre cas à la surface ou au stock sur pied. Pour simplifier, nous avons considéré que tous les individus suivaient la même fonction d'expansion. La courbe « exacte » annuelle est donc le produit de 90 et de $f(x)$.

Chaque individu, à chaque date d'inventaire « a », se voit associer la valeur $f(a)$, représentant une surface ou un volume théorique. La méthode d'interpolation-extrapolation utilisée dans ce chapitre est alors appliquée. Les résultats annuels sont alors additionnés pour créer une courbe interpolée. Les deux courbes (la courbe « exacte » et la courbe interpolée) peuvent alors être comparées.

Quatre fonctions théoriques ont été étudiées, le but étant d'étudier l'effet du lissage en partant de plusieurs hypothèses d'expansion :

- La première fonction utilisée (f_1) est une fonction simple à deux pentes. La rupture de pente a été placée à l'année 2004.
 - De 1961 à 2004, $f_1(x) = 2x$
 - De 2004 à 2010, $f_1(x) = 4x - 4004$

- La deuxième (f_2) est une fonction convexe, décrivant une accélération de l'expansion.

$$f_2(x) = e^{(x-1985.5)/12.25} \quad (f2)$$

- La troisième (f_3) est une fonction concave, traduisant une décélération de l'expansion.

$$f_3(x) = 1/(-e^{\frac{x-1980}{40}}) \quad (f3)$$

- Enfin, la dernière (f4) est une fonction sigmoïde, décrivant une accélération suivie d'une décélération.

$$f_4(x) = \frac{1}{5 + e^{(-0.2(x-1990))}} \quad (f4)$$

4.1.3 Résultats

Nos résultats montrent l'effet de lissage apporté par la méthode d'interpolation-extrapolation. Les variations restent très atténuées. On remarque aussi le décrochage de la courbe interpolée par rapport à la courbe « exacte » dans les premières années en lien avec l'extrapolation des tendances (**Figure 3.1**). Cet effet reste cependant modeste si on commence l'étude en 1976, ce qui correspond à la date où 80% des départements sont inventoriés (**Figure 3.2**). On remarque un fort pourcentage d'erreur sur les premières années pour la fonction f4. Cela est dû au fait que le point d'inflexion que présente cette fonction se situe assez tôt dans la période, au moment où les inventaires sont départementaux. Nous avons utilisé ici des fonctions avec des variations très marquées afin de pouvoir observer les décrochements des courbes obtenues par interpolation-extrapolation. D'après les tendances observées pour les surfaces sur 100 ans, il est impossible d'imaginer qu'une telle fonction, présentant des variations aussi fortes, puisse représenter les variations de surface ou de stock entre 1976 et 2010. Ainsi les fonctions f2 et f3 mais avec des variations moins prononcées semblent plus cohérentes.

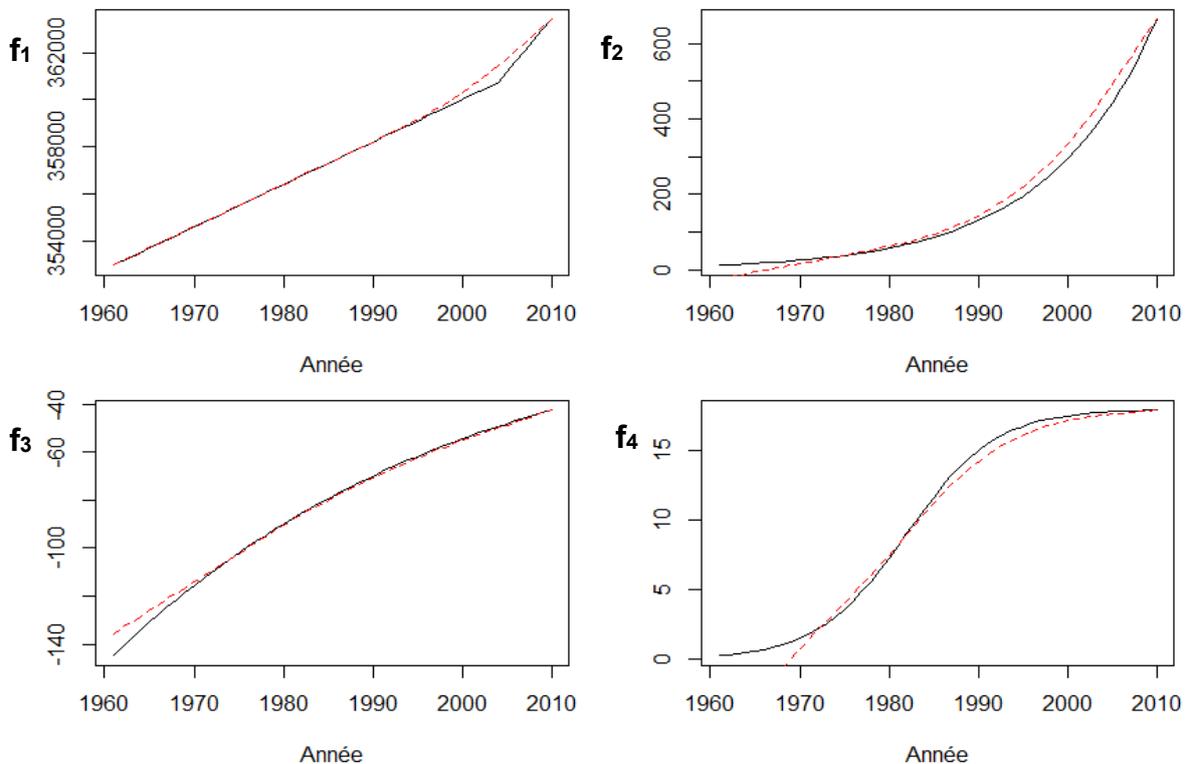


Figure 3.1. Courbes « exactes » (noir) et courbes interpolées (rouge) produites grâce à la méthode d'interpolation-extrapolation pour les 4 fonctions f1, f2, f3 et f4

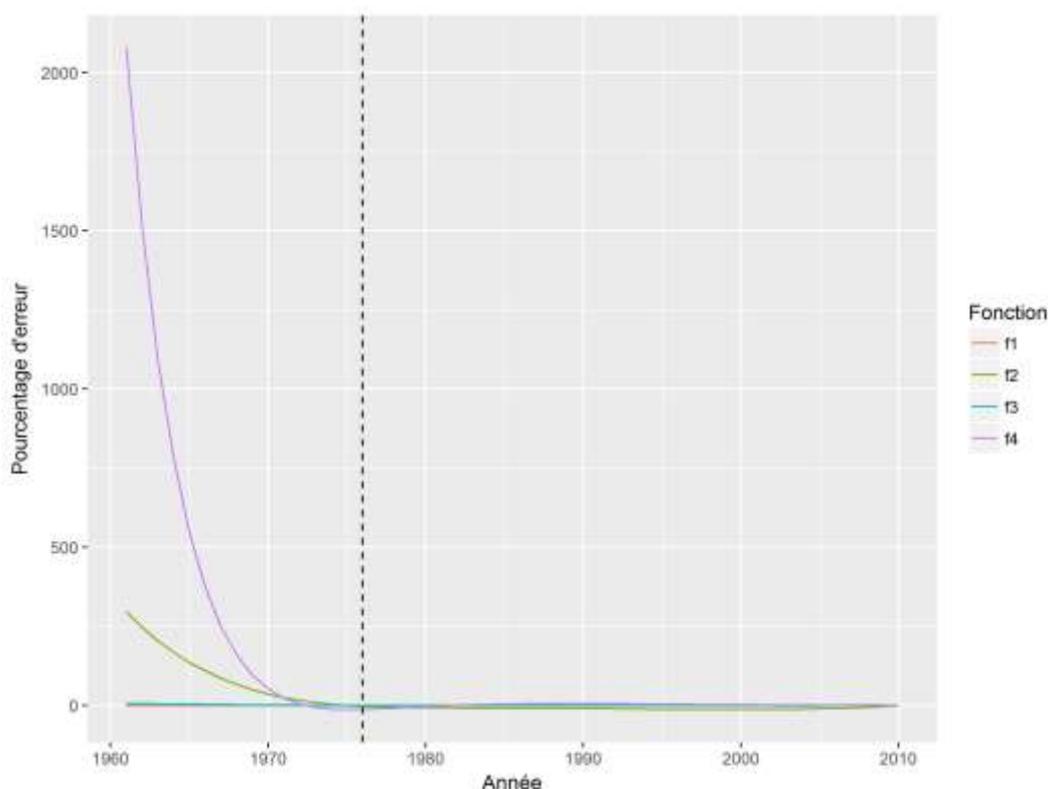


Figure 3.2. Pourcentage d’erreur calculé pour les quatre formules utilisées. La ligne verticale en pointillés représente l’année 1976

4.1.4 Conclusion

L’effet de lissage observé ne cache pas la tendance générale de la courbe. Cependant, nous avons utilisé ici des fonctions théoriques présentant de forts changements de pentes. De plus faibles changements pourraient être masqués. **L’étude du changement de taux d’expansion n’utilisant pas d’interpolation-extrapolation, effectuée dans l’article 2, est donc indispensable pour véritablement déceler une accélération ou décélération.**

Le décrochage observé dans les premières années prouve la nécessité de ne commencer l’étude qu’au moment où une grande part des départements a déjà eu un premier inventaire. Par sécurité, nous avons choisi de ne commencer nos études qu’au moment où cette part est de 80%.

4.2 Analyse de l’expansion forestière en fonction de l’altitude

Dans cette section, nous nous sommes intéressés à l’expansion en surface et en stock des forêts en fonction de leur position géographique (département et GRECO), de leur type de propriété et de leur composition en essence (feuillus/résineux). La surface agricole utile (SAU) a augmenté dans trois départements des Alpes et en Alsace-Lorraine entre 1988 et

2010 et a fortement diminué dans le Massif Central et Le Nord-Ouest de la France (voir partie I, **Figure 1.5**), suggérant une expansion plus intense aux altitudes moyennes et basses. Le milieu montagnard, du fait, entre autre, de son enclavement et de la pente rend l'activité agricole difficile. Ainsi, de nombreuses exploitations ont disparu (Mottet, 2005), favorisant l'expansion spontanée des forêts sur ces terres. Il semble donc y avoir un lien entre altitude et expansion forestière.

Bien que les départements et les GRECO permettent d'avoir une idée de l'expansion en fonction de l'altitude, nous avons voulu étudier plus précisément cette structuration.

Pour cela, les données de surface et de stock AM et NM de l'IFN ont été utilisées et ont été stratifiées en fonction de leur classe d'altitude (**Tableau 3.1 ; Figure 3.3**). Comme précédemment, un point unique a été créé à partir des données NM et une interpolation entre inventaires a permis de retracer l'évolution des surfaces. Les premiers inventaires AM n'informent pas sur la donnée d'altitude et l'étude n'a pu commencer qu'en 1997. La période d'étude est donc très réduite (1997-2010) et l'étude a dû être effectuée sans le département de l'Ariège (09) car celui-ci ne présentait pas d'inventaire AM sur cette période.

Classe d'altitude	Définition
1	Altitude inférieure à 200 m
2	Altitude comprise entre 200 et 400 m
3	Altitude comprise entre 400 et 600 m
4	Altitude comprise entre 600 et 1000 m
5	Altitude comprise entre 1000 et 1400 m
6	Altitude supérieure à 1400 m

Tableau 3.1. Classes d'altitude IFN

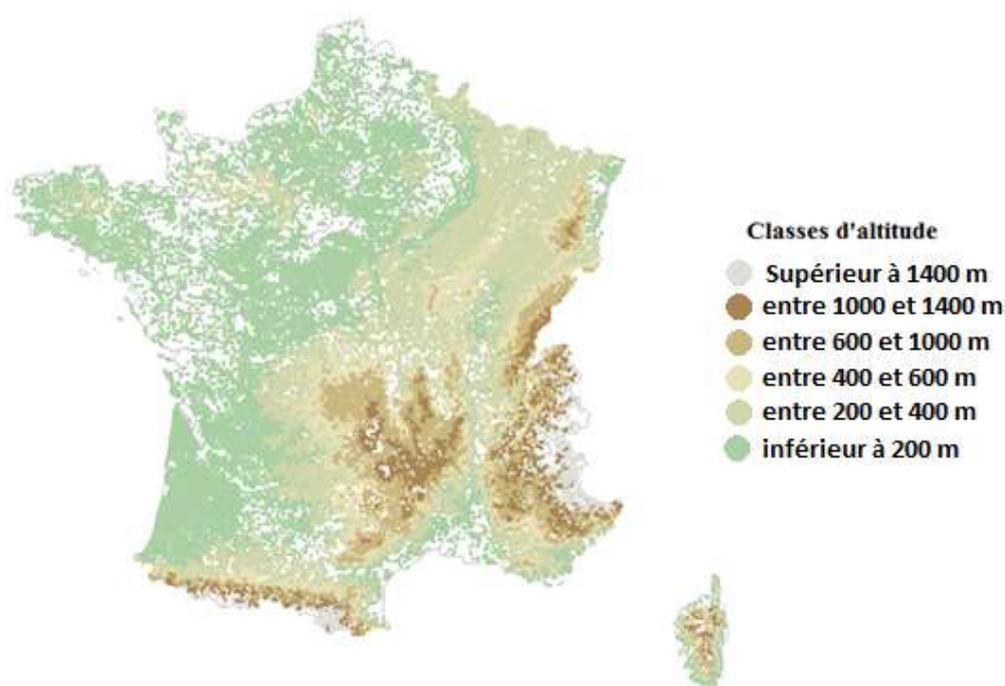


Figure 3.3. Localisation des points IFN en fonction de leur classe d'altitude

Environ 60% la surface et du stock des forêts françaises se trouvent à des altitudes inférieures à 400 m. La surface et le stock forestiers ont augmenté dans toutes les classes d'altitude. Les plus fortes variations absolues de surface sont observées dans les basses altitudes (en deçà de 400 m ; **Figure 3.4** ; **Tableau 3.2**) alors que celle de stock sur pied sont observées entre 200 et 1000 m d'altitude. Cependant, les plus fortes variations relatives sont observées dans les classes de moyenne altitude (entre 400 et 1400 m pour les surfaces et entre 200 et 1400 m pour les stocks). Les forêts entre 400 et 1400 m d'altitude voient leur part en surface et en stock dans la forêt totale augmenter (intensité d'expansion¹⁰ supérieure à 1) et sont principalement localisées dans le Sud et dans les Alpes (**Figure 3.5** ; **Figure 3.6**). Les zones montagnardes principalement touchées sont les Alpes et les Pyrénées. De nombreux départements présentent une diminution de leur surface forestière et de leur stock sur pied dans la classe d'altitude 2 (200-400 m), principalement dans le Nord du pays mais aussi dans le Sud-Ouest.

L'étude commençant en 1997, la politique de plantations du FFN, particulièrement vigoureuse dans le Massif Central, n'explique pas ici cette augmentation au niveau des moyennes altitudes. Il semblerait donc que cette augmentation soit principalement due à la déprise agricole. Entre 1992 et 2002, les alpages, landes et parcours ont vu leur surface diminuer de 240 000 ha et les prairies de 950 000 ha (Agreste – Teruti, 1992 et 2002).

L'augmentation observée dans les Alpes est en accord avec les résultats de Chakir et Madignier (2006) entre 1992 et 2003. Dans les Alpes suisses, la plus forte fréquence de

¹⁰ part de la strate dans l'expansion totale (en volume de bois / surface), rapportée à la part initiale que représente cette strate dans l'ensemble de la forêt (voir articles 1 et 2)

reboisement a été observée à des altitudes plus élevées qu'en France, comprises entre 1400 et 2100 m (Gellrich *et al.*, 2007). Cependant, la SAU a augmenté dans trois départements des Alpes françaises entre 1988 et 2010 et n'explique donc pas l'augmentation observée.

Aux faibles altitudes, les sols, souvent plus fertiles et moins escarpés, présentent des qualités pour l'agriculture ou l'implantation de zones urbaines, expliquant les diminutions observées dans la zone 200-400 m mais pas les augmentations aux plus basses altitudes (0-200 m) qui semblent correspondre à la déprise agricole observée dans l'Ouest du pays (**Figure 1.5**).

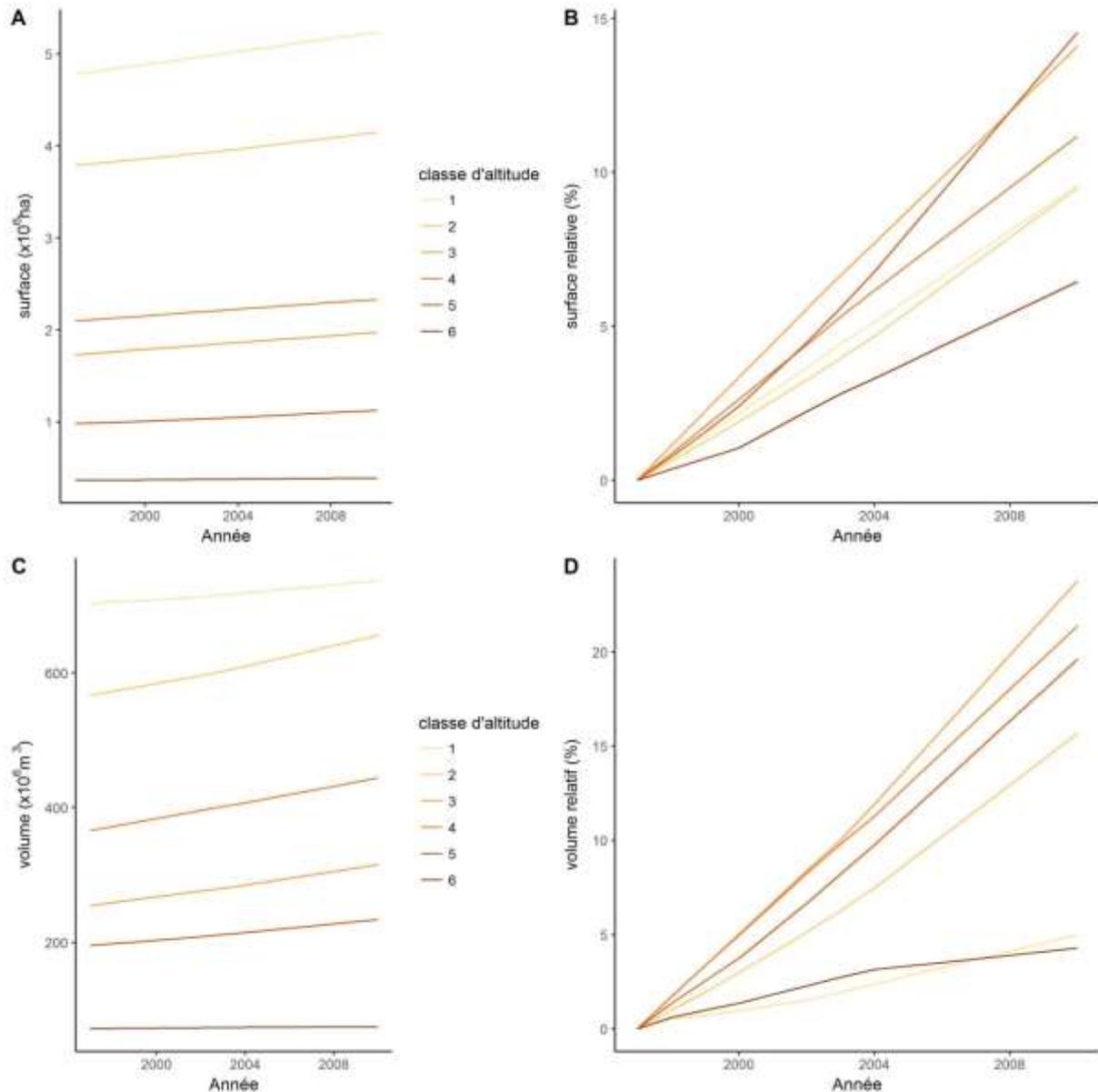


Figure 3.4. Changement de surface et de stock absolue et relative des forêts par classe d'altitude entre 1997 et 2010

Classe d'altitude	Surface en 1997 (x10 ³ ha)	Part dans la surface totale en 1997 (%)	Surface en 2010 (x10 ³ ha)	Variation absolue (x10 ³ ha)	Variation relative (%)	R	Stock en 1997 (x10 ⁶ m ³)	Part dans le stock total en 1997 (%)	Stock en 2010 (x10 ⁶ m ³)	Variation absolue (x10 ⁶ m ³)	Variation relative (%)	R
1	4 780	34,8	5 238	+459	+9,6	0,9	702	32,5	737	+35	+5,0	0,2
2	3 788	27,6	4 148	+360	+9,5	0,9	567	26,3	656	+89	+15,7	0,6
3	1 730	12,6	1 975	+244	+14,1	1,3	255	11,8	316	+ 61	+23,8	2,0
4	2 098	15,3	2 332	+235	+11,2	1,0	366	17,0	444	+ 78	+21,4	1,3
5	984	7,2	1 127	+143	+14,6	1,4	196	9,1	234	+ 38	+19,6	2,2
6	366	2,7	389	+24	+6,5	0,6	72	3,3	75	+ 3	+4,3	1,3

Tableau 3.2. Variations de surface forestières et de stock sur pied absolues et relatives en fonction de la classe d'altitude entre 1997 et 2010. R correspond à l'intensité d'expansion.

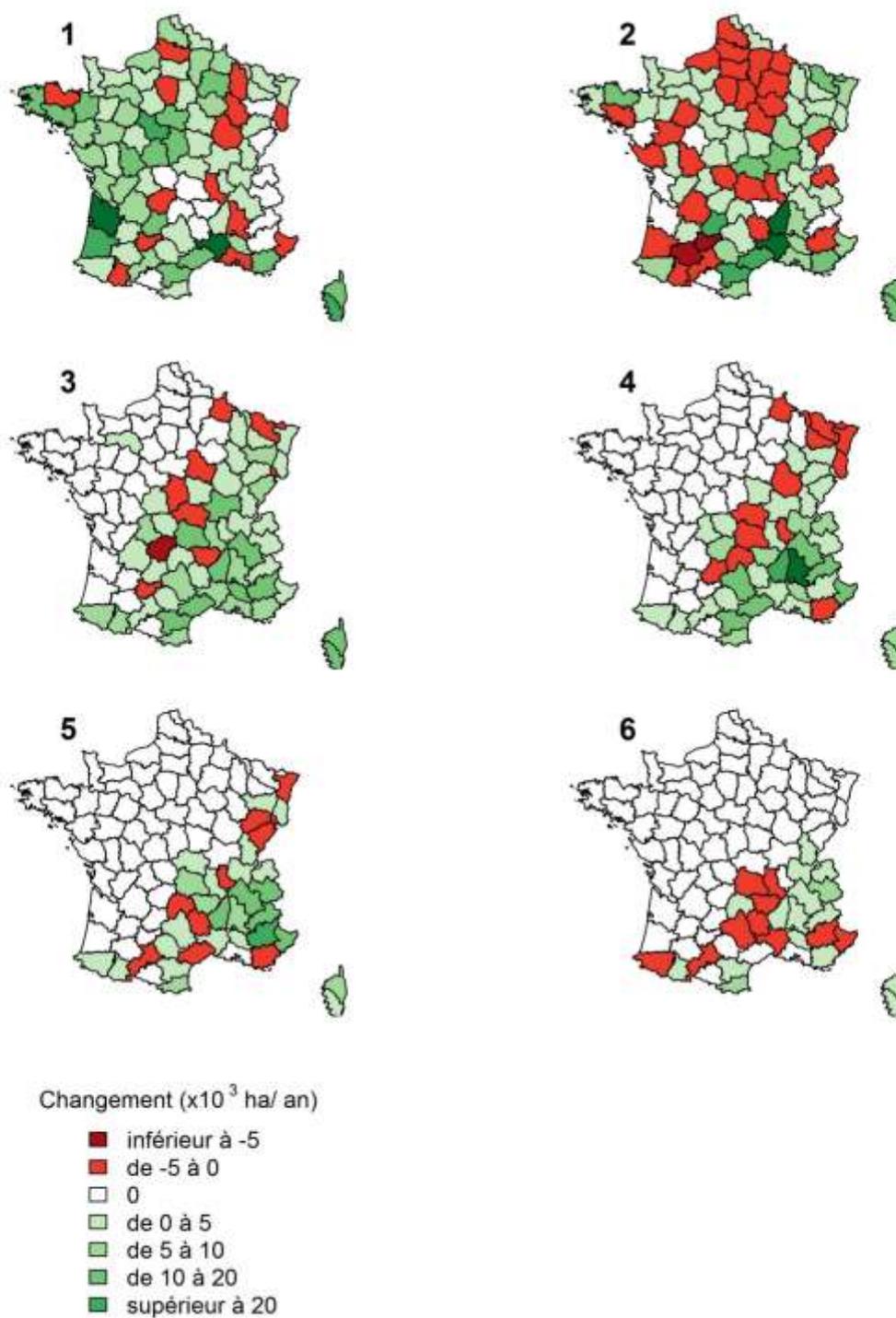


Figure 3.5. Variations de surface forestière par département en fonction de la classe d'altitude entre 1997 et 2010

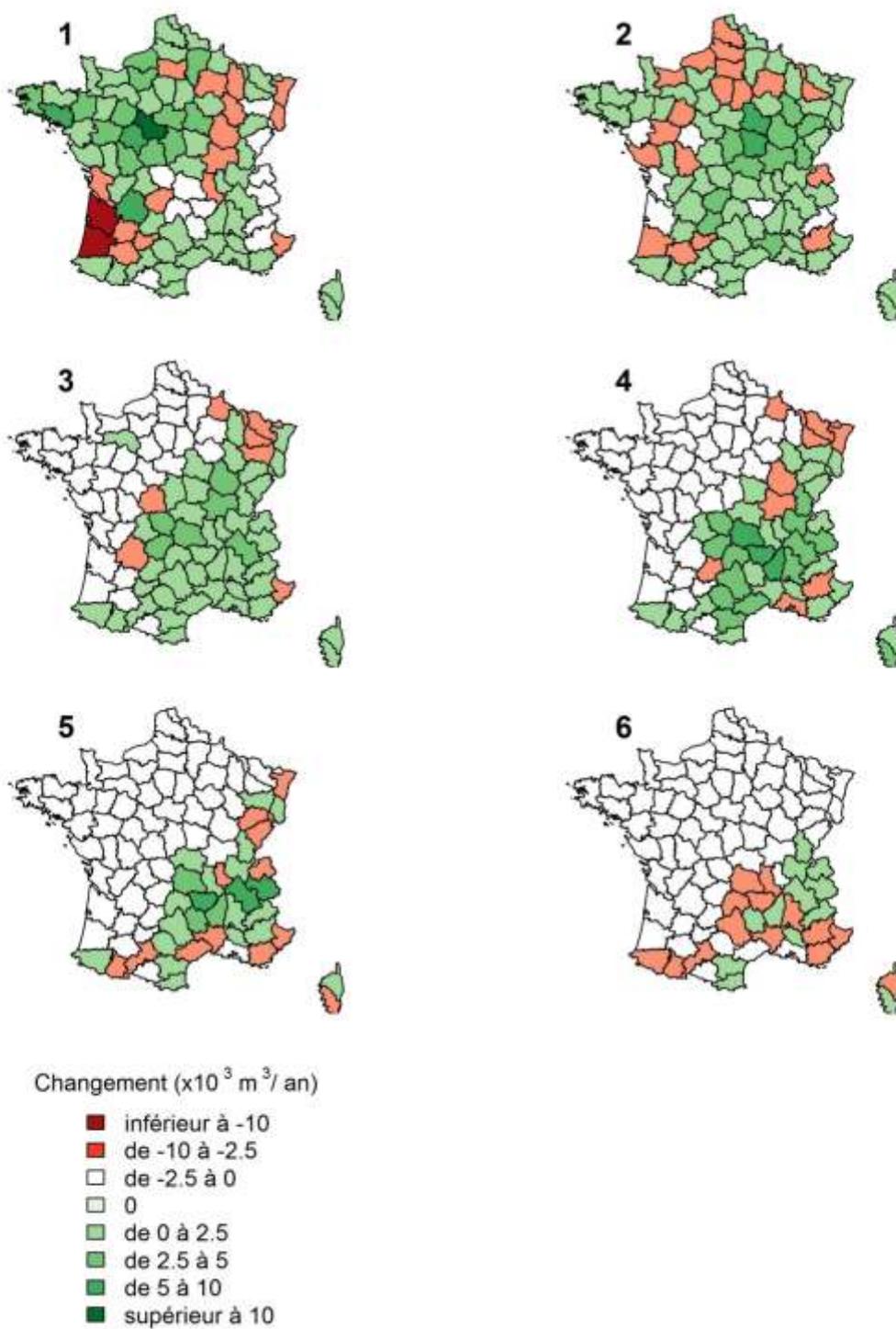


Figure 3.6. Variations du stock sur pied par département en fonction de la classe d'altitude entre 1997 et 2010

Résumé du chapitre III

Les forêts européennes connaissent actuellement une phase d'expansion à la fois en surface et en stock sur pied. Alors que l'expansion en stock sur pied est bien plus rapide que celle en surface, elle reste beaucoup moins étudiée.

Dans nos deux études, nous avons analysé l'expansion en surface mais plus encore en stock sur pied des forêts françaises afin de comprendre i) les patrons de variations à travers la géographie, les types de propriété et de composition en essence, ii) leurs dynamiques en essayant de localiser la phase d'expansion dans laquelle se trouve la forêt française, et iii) les mécanismes d'expansion en stock sur pied en étudiant la relation entre les variations de stock et certains attributs de la forêt : stock initial, densité initiale et expansion récente des surfaces.

Nos analyses ont permis de montrer qu'entre 1908 et 1975, l'expansion en surface a été plus intense dans le Massif Central alors que depuis 1975 elle est plus intense en Bretagne et dans le Sud-Est. Alors que l'expansion dans le Massif Central semble correspondre aux politiques de boisement (comme le FFN), celle en Bretagne et dans le Sud du pays semble principalement liée à la déprise agricole et à une expansion naturelle. Entre 1975 et 2010 l'expansion en stock sur pied est plus forte dans le Massif Central, indiquant une maturation des peuplements précédemment implantés. Entre 1908 et 2010, l'expansion en surface des forêts feuillues a été deux fois plus forte que celle des résineuses mais la proportion globale reste inchangée (>2/3 feuillus) avec, cependant, une hétérogénéité régionale. Depuis 1975, l'expansion en surface et en stock est beaucoup plus forte dans les forêts privées et principalement les forêts privées feuillues, indiquant le rôle important des expansions spontanées. Pour l'instant, aucun signe de saturation en surface et en stock n'a été relevé au niveau national. Une accélération de l'expansion a même été observée dans les forêts privées. Les modèles statistiques ont permis de montrer la contribution positive du stock initial et de l'expansion passée des surfaces sur les variations de stock sur pied. Bien que la densité semble jouer un rôle croissant de limitation de l'expansion, son effet reste encore très en deçà de celui du stock initial et le stock sur pied des forêts françaises devrait continuer encore longtemps à augmenter et former ainsi un puit de carbone important permettant de d'atténuer le changement climatique.

L'étude complémentaire sur l'effet de la méthode d'interpolation-extrapolation a montré que celle-ci a un effet de lissage sur nos données. Bien que cette méthode soit indispensable pour permettre une lecture annuelle des données en ancienne méthode, ces résultats montrent l'importance d'utiliser les données brutes pour scruter la présence d'une saturation de l'expansion, ce qui a été fait en parallèle.

Enfin, l'étude de l'expansion par classe d'altitude n'a pu être effectuée que sur une période très restreinte (1997-2010), empêchant de tirer des conclusions sur une tendance sur le long terme. Cependant, nos résultats montrent que les plus fortes expansions relatives de surface se trouvent dans les classes de moyenne altitude (entre 400 et 1400 m), localisées principalement dans le sud du pays et les Alpes. Cette augmentation est à priori liée à la déprise agricole qui a lieu dans ces régions.

IV - Analyse contextualisée des mécanismes d'expansion du stock de bois sur pied

1 Introduction, grands principes de l'analyse

1.1 Analyse du bilan de stock de bois en surface terrière

Nous avons précédemment analysé la dynamique des forêts françaises en étudiant les variations de surface, de stock de bois et de densité de stock à travers des strates définies par le département, la propriété et la composition en essence. L'analyse a permis de caractériser cette expansion et de révéler les fortes hétérogénéités en fonction des différents facteurs étudiés.

Les données de l'IFN, en plus de renseigner la surface et le volume, apportent des informations dendrométriques telles que le diamètre des arbres, permettant de **ventiler le stock de bois par stade de maturation dimensionnelle des forêts**. De plus, les flux de bois, comprenant la croissance des arbres sur les 5 ou 10 dernières années, l'évaluation du recrutement, l'inventaire des arbres morts ou prélevés, sont également renseignés. **Ces informations permettent une analyse des mécanismes démographique d'expansion en stock sur pied, en tentant de comprendre quels sont les termes du bilan de stock de bois qui influencent son augmentation. Le principe est d'établir ce bilan à partir des inter-cycles départementaux de l'inventaire AM (dont la durée est en moyenne supérieure à 10 ans).**

L'étude sera conduite, non pas sur le volume de bois, mais sa surface terrière. La raison fondamentale est de se rapprocher le plus possible de mesures vraies, et non pas d'estimations fondées sur des modèles, dans un contexte où nous verrons qu'un des termes du bilan, les prélèvements de bois, est fortement sous-estimé par une procédure d'inventaire qui repose depuis son origine sur des placettes temporaires. Dans ce contexte, les prélèvements seront dits estimés par la « méthode du bilan », les autres flux ne posant a priori pas de difficulté.

1.2 Une analyse contextualisée et hiérarchique

L'analyse sera contextualisée selon les régions écologiques de l'inventaire (GRECO), la propriété, et les espèces forestières, à partir d'une partition des forêts françaises qui permettra d'identifier les grands systèmes de production à l'œuvre dans l'expansion (et en négligeant la composition des plus petits), en les mettant en correspondance avec leurs propriétés dynamiques. L'étude a été menée à deux niveaux hiérarchiques : d'abord au niveau de strates de la forêt française définies par régions écologiques et classes de propriété, puis en introduisant les essences forestières, auxquelles une structuration diamétrique apporte une information sur le stade de maturité de ces forêts. **Les raisons essentielles tiennent : (i) à la nécessité d'explorer progressivement les mécanismes de l'expansion, (ii) à la nature très différente des données mobilisées, la première analyse du stock ayant un sens au**

niveau des « points d'inventaire », la seconde ayant un sens au niveau de l'arbre (essence, classe de diamètre), auquel aucune surface forestière de référence ne se rattache.

Le nombre d'essences identifiées par l'IFN étant trop important et ne permettant pas une bonne lisibilité des résultats, une analyse des compositions en essences de la forêt française a permis de sélectionner les essences dominantes dans chaque GRECO, les autres étant regroupés selon deux groupes généraux « divers feuillus » et « divers résineux », et d'ainsi diminuer le nombre de strates étudiées.

Les deux partitions successives apportent une information différente (**Figure 4.1**). La partition par GRECO et propriété permet d'identifier des groupes de strates présentant la même dynamique et d'adjoindre les variations de surfaces forestières à cette analyse. L'analyse des stocks par essence forestière et par classe de diamètre repose sur des informations au niveau de l'arbre, sans analyse complémentaire à ce niveau. Cependant, ce niveau de résolution supérieure permet de relier les dynamiques précédemment observées à des structures diamétriques et des essences et ainsi de mieux approcher les causes forestières de l'expansion, comme, par exemple, la conversion des TSF ou la plantation d'essences à croissance rapide.

Un schéma de la démarche de l'analyse est présenté en **Figure 4.2**.

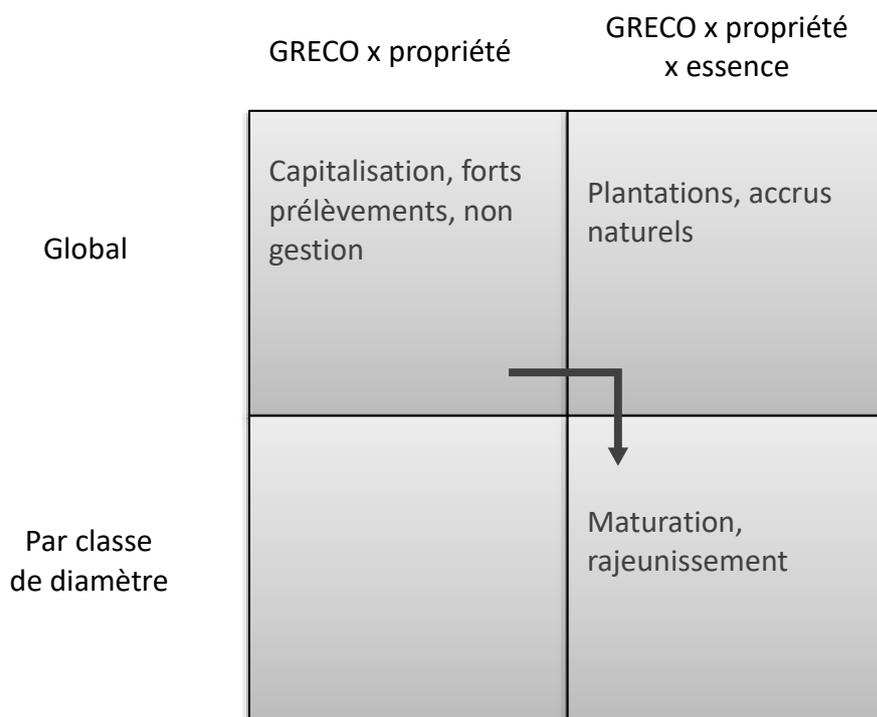


Figure 4.1. Schéma de la démarche hiérarchique de l'analyse de l'expansion du stock de bois sur pied

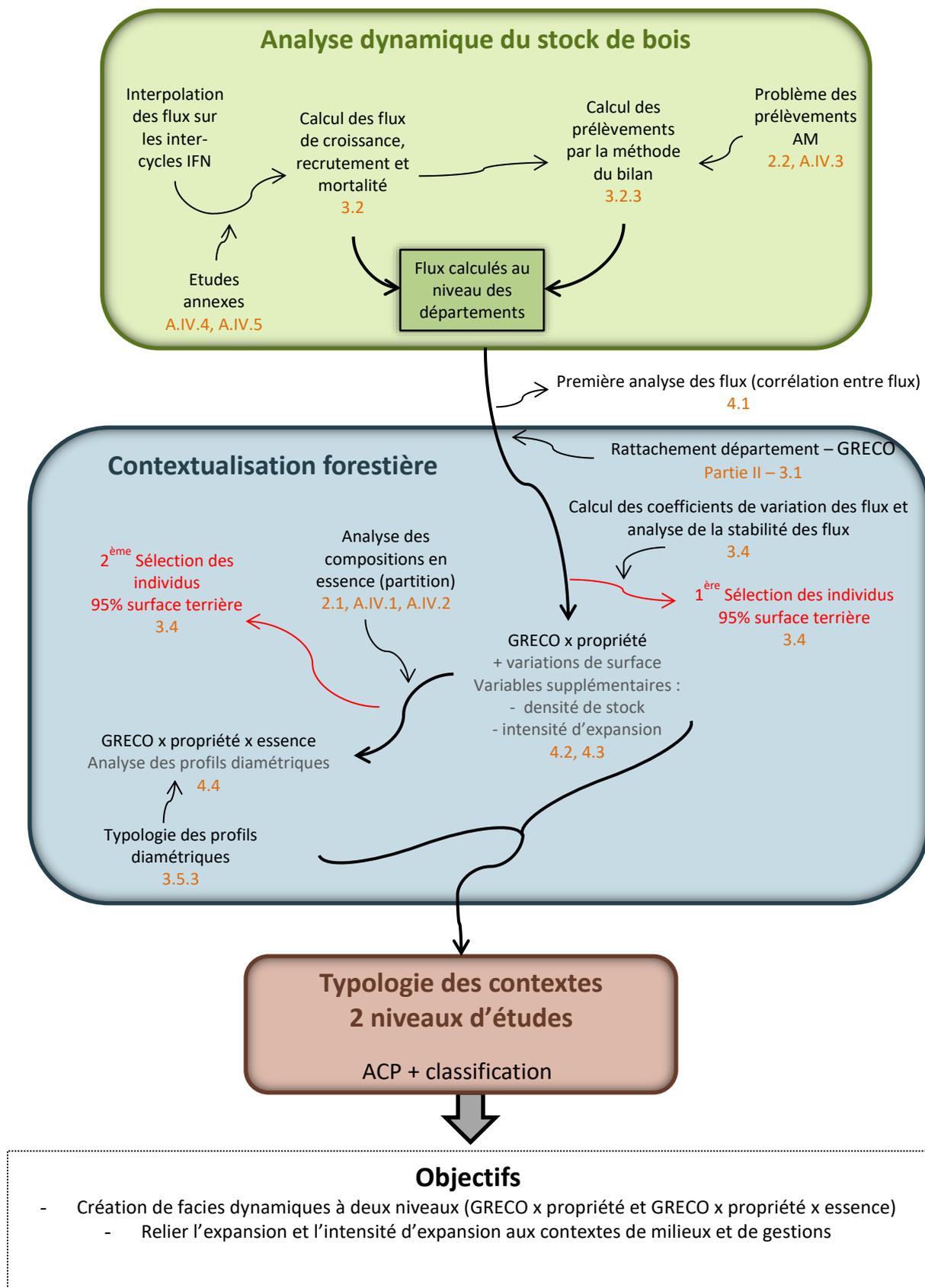


Figure 4.2. Démarche de l’analyse de la dynamique des stocks des forêts française. Les indices renvoient à des parties du manuscrit.

2 Analyses techniques préliminaires

En préalable à l'analyse des flux de bois, des analyses préliminaires ont été nécessaires. Elles ont permis :

- i) De constituer la partition de la forêt française en identifiant les compositions en essences dominantes dans chaque GRECO, en s'assurant de sa compatibilité entre méthodes d'inventaire.
- ii) D'analyser la continuité de la donnée de prélèvements de bois entre ancienne (AM/M1) et nouvelle méthodes (NM/M2) et ainsi de mettre en œuvre une stratégie d'estimation recevable.
- iii) D'estimer enfin certaines données dendrométriques non systématiquement disponibles (épaisseur d'écorce de l'arbre à partir du diamètre à 1,30 m et circonférence à 1,30 m en fonction de la circonférence à la base), par exemple pour les arbres prélevés dont le diamètre à 1,30 m n'est par définition pas connu.

Les résultats fondamentaux de ces analyses sont présentés à la suite, les développements techniques étant renvoyés dans des annexes de cette partie (**Annexes IV**).

2.1 Identification des compositions dominantes sur les surfaces des forêts françaises

Le nombre d'essences différentes relevées dans la forêt française est très élevé (90 essences identifiées par l'IFN ; voir partie II – 2.1). Cette diversité ne permet pas une bonne lisibilité des résultats et risque de donner trop d'importance à des compartiments non significatifs de la forêt française, de nombreuses essences étant très peu représentées.

Dans un premier temps, il a donc été décidé de travailler avec les compositions en essences des points d'inventaires plutôt que les essences d'arbres, ayant l'avantage de la solidité des mesures fondamentales prises sur le terrain pour celles collectées dans la nouvelle méthode d'inventaire. Cependant, le nombre de compositions identifiées par l'IFN est encore important (117 modalités, IGN, 2014) et doit être réduit.

Ces compositions sont basées sur les taux de couvert libre relatifs (TCLR ; **Encadré 4.1**) des différentes essences, correspondant au rapport, pour chaque essence, de la surface des houppiers ayant accès à la lumière sur la surface totale de la placette couverte par les houppiers des arbres (IGN, 2014).

Mesure des compositions dans la nouvelle méthode d'inventaire (NM)

La procédure de construction des types de composition NM est expliquée par Morneau *et al.* (2008). Elle peut être résumée comme suit :

- Peuplements sans composition : peuplement dont le couvert absolu de la strate recensable est strictement supérieur à 15%
- Identification des peuplements purs :
 - une essence avec un TCLR supérieur à 75%
 - ou
 - une essence avec un TCLR supérieur à 50% et aucune autre avec un TCLR supérieur à 15%
- Identification des peuplements mélangés : peuplements où au moins deux essences ont des TCLR compris entre 15 et 75%. On y trouve, des mélanges feuillus (où la somme des TCLR des feuillus est supérieure ou égale à 75%), des mélanges résineux (où la somme des TCLR des feuillus est inférieure à 25%), et des mélanges mixtes (où la somme des TCLR des feuillus est comprise entre 25 et 75%). Ces peuplements sont ensuite regroupés dans les 91 types de mélanges identifiés par l'IFN.

Encadré 4.1. Description de procédure de construction des types de composition dans la nouvelle méthode d'inventaire forestier

Le TCLR n'est pas disponible en AM. Cependant, une donnée d' « importance essence » (IMPRESS) renseigne sur le couvert relatif des essences. Nous avons donc dans un second temps vérifié si cette donnée était utilisable afin de partitionner les compositions en AM et voir si ces compositions étaient cohérentes avec celles identifiées en NM.

Finalement, une analyse a été indispensable pour :

- i) regrouper ces compositions déjà identifiées par l'IFN en ensembles dominants significatifs dans la forêt, les autres ensembles étant regroupés au sein de compartiments régionaux génériques « divers feuillus / divers résineux / Divers mixtes »
- ii) Tenter d'utiliser la donnée de composition des points d'inventaire AM, afin de voir si cette donnée peut être homogénéisée entre AM et NM, **ce qui n'a pas été le cas**,
- iii) Transcrire cette partition en stock de bois attaché à l'information d'essence collectée sur les arbres, seule méthode permettant d'assurer une continuité temporelle.

2.1.1 Partition de la surface forestière en compositions dominantes sur la nouvelle méthode.

La première phase du travail a consisté en la création d'une partition en composition plus simple que celle présente dans les données IFN. Il a été décidé de travailler au niveau des GRECO et d'identifier dans chacune d'entre elles les compositions en essence dominantes.

Les données utilisées dans cette analyse sont les moyennes entre 2005 et 2014 des surfaces et des stocks sur pieds des forêts de chaque GRECO ventilées par type de composition. A l'intérieur de chaque GRECO, les compositions ont été ordonnées par ordre de surfaces décroissantes. Les types principaux, représentant une part importante de la surface forestière totale, et les essences se retrouvant souvent en mélange ont été identifiés. Des regroupements ont alors été effectués entre les différents mélanges comportant ces essences afin de créer de nouveaux types plus agrégés. A partir de ces nouvelles compositions, les types les plus importants sont sélectionnés jusqu'à ce qu'au moins 50% de la surface forestière de la GRECO soit représentée. Une certaine homogénéité entre GRECO voisines et entre GRECO de montagnes est recherchée afin de garder une certaine cohérence. Après avoir atteint les 50%, les compositions non sélectionnées sont regardées au cas par cas et ont pu être rajoutées si la part de la surface et du volume qu'elles représentent est considérée comme non-négligeable et que ces peuplements sont historiquement importants (exemple des peuplements purs de mélèzes dans les Alpes). Les compositions non-sélectionnées sont ensuite regroupées en 3 catégories : pur feuillus, pur résineux et mixtes. **Une description plus détaillée du protocole est présentée dans un article récemment soumis (Bontemps *et al.*, soumis ; Annexe IV.1).**

Afin de faire des choix de regroupements de composition judicieux, il a parfois été utile d'étudier la localisation des différentes compositions afin de voir si elles correspondent à des milieux différents ou non. Cela a été le cas pour les pins de Corse et les châtaigniers purs et en mélange de la GRECO SO. La localisation des pins en Corse montre que les pins laricio et maritime sont présents sur des milieux différents. Alors que le pin laricio est plus présent sur les hauteurs, le pin maritime est principalement localisé plus près de la côte. Il a donc été décidé de ne pas regrouper ces deux pins sous une seule et même composition. L'étude des châtaigniers du SO montre en revanche que la localisation des châtaigneraies pures et mélangées est identique. De plus, il a été vérifié que le nombre de plantations identifiées par l'IGN de châtaigniers purs n'est pas élevé. Il a donc été choisi de regrouper ces deux types.

Ce travail a permis d'identifier 27 types de composition différents, sans compter les trois grands types agrégés (feuillus résineux et mixtes ; **Tableau 4.1**). Entre 4 (GRECO GO et Co) et 11 (GRECO MC) types de compositions ont été identifiés pour chaque GRECO. La surface totale représentée par ces types se situe entre 51,8 (GRECO Py) et 76,2% (GRECO SO) de la surface totale des GRECO. Certaines compositions ont été identifiées dans de nombreuses GRECO et représentent donc une part importante de la forêt française. C'est le cas des types « pur chêne sessile » (identifié dans les GRECO GO, CN, GE, Vo et MC) et « mélange de

chêne pédonculé et autre(s) feuillu(s) » (identifié dans les GRECO GO, CN, GE, SO, MC et Py). Au contraire, d’autres compositions sont spécifiques à une seule GRECO comme le « pur mélèze » dans les Alpes et le « pur Douglas » dans le Massif Central. Enfin, certains types sont spécifiques à un seul type de GRECO comme les peuplements purs d’épicéa dans les GRECO montagnardes hors Pyrénées (Vo, Ju, MC et Al).

GRECO	Abréviation	Composition	Surface (x10 ³ ha)	Part dans la surface totale de la GRECO (%)	Volume (x 10 ⁶ m ³)
Grand-Ouest Cristallin et Océanique	GO	Chêne pédonculé et autre(s) feuillu(s)	137,6	23,7	20,8
		Pur chêne pédonculé	70,2	12,1	10,5
		Pur pins	55,8	9,6	10,2
		Pur chêne sessile	42,0	7,2	8,9
		Pur chêne sessile	422,6	16,1	96,2
Centre Nord semi- océanique	CN	Chêne pédonculé et autre(s) feuillu(s) (autre que frêne et charme)	345,5	13,1	55,7
		Frêne pur ou avec feuillu(s)	327,5	12,5	59,7
		Charme pur ou avec chêne(s) (et autre(s) feuillu(s))	292,2	11,1	55,1
		Pur chêne pédonculé	256,9	9,8	44,6
		Pur pins	185,9	7,1	37,0
Grand Est semi- continental	GE	Charme pur ou avec chêne(s) (et autre(s) feuillu(s))	344,3	17,2	59,5
		Hêtre pur ou avec chêne sessile (et autre(s) feuillu(s))	317,0	15,8	64,7
		Frêne pur ou avec feuillu(s)	308,2	15,4	61,6
		Chêne pédonculé et feuillu(s) (autre que frêne et charme)	175,8	8,8	30,3
		Pur chêne sessile	144,7	7,2	27,9
Vosges	Vo	Hêtre et sapin et/ou épicéa (et autre(s))	72,6	13,3	21,8
		Pur sapin	66,1	12,1	22,2
		Pur hêtre	63,6	11,7	16,1
		Pur épicéa	51,8	9,5	19,8
		Mélange sapin et épicéa	33,3	6,1	11,4
		Hêtre et chêne sessile (et autre(s) feuillu(s))	32,3	5,9	8,9
		Pur chêne sessile	25,5	4,7	6,5
Jura	Ju	Hêtre et sapin et/ou épicéa (et autre(s))	102,6	21,7	30,0
		Frêne pur ou avec feuillu(s)	82,9	17,5	14,5
		Pur épicéa	46,4	9,8	16,0
		Pur hêtre	32,1	6,8	8,0
		Pur sapin	31,7	6,7	12,7
		Mélange sapin et épicéa	28,0	5,9	9,9

Tableau 4.1. Compositions identifiées par GRECO

GRECO	Abréviation	Composition	Surface (x10 ³ ha)	Part dans la surface totale de la GRECO (%)	Volume (x 10 ⁶ m ³)
Sud-Ouest océanique	SO	Pur pin maritime	601,2	29,6	75,6
		Pur chêne pubescent	370,7	18,2	38,0
		Châtaignier pur ou avec feuillu(s)	204,2	10,1	32,4
		Chêne pédonculé et feuillu(s) (autre que châtaignier)	203,6	10,0	31,6
		Pur chêne pédonculé	169,0	8,3	26,3
		Chêne pédonculé et feuillu(s) (autre que châtaignier)	258,2	10,0	47,2
		Châtaignier pur ou avec feuillu(s)	254,4	9,8	41,7
Massif Central	MC	Pur douglas	173,9	6,7	54,7
		Pin sylvestre et feuillu(s)	161,5	6,2	25,6
		Pur pin sylvestre	157,0	6,1	25,4
		Pur hêtre	138,5	5,3	31,7
		Pur chêne pédonculé	124,0	4,8	23,9
		Pur chêne pubescent	114,2	4,4	7,6
		Pur épicéa	107,2	4,1	34,2
		Pur chêne sessile	103,7	4,0	20,2
		Pur sapin	102,3	3,9	41,3
		Alpes	Al	Pur pin sylvestre	200,7
Pin sylvestre et feuillu(s)	120,3			10,5	12,0
Hêtre et sapin et/ou épicéa (et autre(s))	105,0			9,2	33,3
Pur chêne pubescent	76,2			6,7	3,9
Pur hêtre	73,4			6,4	15,4
Pur épicéa	68,1			5,9	25,1
Pur mélèze	61,6			5,4	12,4
Pur pin noir	48,8			4,3	6,8
Pyrénées	Py	Pur hêtre	131,8	19,1	27,5
		Frêne pur ou avec feuillu(s)	92,2	13,4	13,1
		Pur chêne pubescent	46,2	6,7	3,6
		Chêne pédonculé et feuillu(s) (autres que frêne)	44,9	6,5	8,3
		Pur sapin	42,0	6,1	14,0

Tableau 4.1. Compositions identifiées par GRECO (suite)

GRECO	Abréviation	Composition	Surface (x10 ³ ha)	Part dans la surface totale de la GRECO (%)	Volume (x 10 ⁶ m ³)
Méditerranée	Me	Pur chêne vert	255,8	22,9	8,7
		Pur chêne pubescent	189,2	16,9	11,3
		Chêne(s) et pin	155,5	13,9	11,6
		Pur pin d'Alep	138,7	12,4	10,7
		Chêne vert et pubescent	94,0	8,4	4,7
Corse	Co	Chêne vert et feuillu(s)	95,3	28,2	8,1
		Pur chêne vert	82,1	24,3	7,4
		Pur pin laricio	23,8	7,0	7,2
		Pur pin maritime	23,1	6,8	5,5

Tableau 4.1. Compositions identifiées par GRECO (fin)

2.1.2 Essai d'homogénéisation des informations de composition en essence des points d'inventaire entre l'ancienne et la nouvelle méthode d'inventaire

Cette démarche est présentée en **Annexe IV.2**.

L'analyse montre qu'il n'est pas possible d'utiliser l'information IMPESS collectée en ancienne méthode pour « reconstruire » des compositions compatibles avec celles de la NM. **Ce résultat nous a conduits à considérer l'information d'essence à l'échelle de l'arbre (donnée exacte) et non du point.**

Finalement, la stratégie a consisté à reprendre la partition constituée sur les surfaces forestières en la transposant aux volumes. L'**Annexe IV.1** montre que cette transposition est aisée. Pour chaque GRECO, nous nous sommes donc appuyés sur les compositions identifiées en 1.1 afin de sélectionner les essences **dominantes en stock dans les forêts françaises, et avec une homogénéité garantie entre méthodes (Tableau 4.2)**. **Dans chaque GRECO, les essences non dominantes sont regroupées en « divers feuillus » et « divers résineux »**. Les trois essences les plus représentées pour chaque GRECO dans ces deux classes ont été identifiées (**Tableau 4.3**). Parmi les feuillus, on y retrouve régulièrement le châtaignier (GRECO GO, CN, Al, Py, Me et Co), le bouleau dans la moitié Nord (GRECO GO, CN, GE et MC) ainsi que divers chênes (chêne sessile, pédonculé, tauzin et chêne-liège). Parmi les résineux, le Douglas est très présent (GRECO GO, CN, Vo, Ju, SO et Me).

2 – Analyses techniques préliminaires

GRECO	Abréviation de la GRECO	Essences dominantes			
		Feuillus	Volume (x10 ⁶ m ³)	Résineux	Volume (x10 ⁶ m ³)
Grand-Ouest Cristallin et Océanique	GO	Chêne pédonculé	23	Pins (pin laricio, pin maritime, pin sylvestre)	18
		Chêne sessile	12		
		Hêtre	8		
Centre Nord semi-océanique	CN	Chêne sessile	163	Pins (pin laricio, pin maritime, pin noir, pin sylvestre)	67
		Chêne pédonculé	119		
		Charme	44		
		Hêtre	39		
		Frêne	30		
Grand Est semi-continental	GE	Chêne sessile	58		
		Hêtre	53		
		Chêne pédonculé	44		
		Charme	38		
		Frêne	20		
Vosges	Vo	Hêtre	32	Sapin	38
		Chêne sessile	16	Epicéa	31
		Chêne pédonculé	7		
Jura	Ju	Hêtre	26	Epicéa	38
		Frêne	9	Sapin	34
Sud-Ouest océanique	SO	Chêne pédonculé	49	Pin maritime	99
		Chêne pubescent	42		
		Châtaignier	28		
Massif Central	MC	Chêne pédonculé	55	Douglas	67
		Hêtre	55	Sapin	66
		Chêne sessile	42	Pin sylvestre	52
		Châtaignier	39	Epicéa	49
		Chêne pubescent	17		
Alpes	Al	Hêtre	37	Epicéa	61
		Chêne pubescent	16	Pin sylvestre	39
				Sapin	36
Pyrénées	Py			Mélèze	20
		Hêtre	37	Pin noir	11
		Chêne pédonculé	22	Sapin	17
		Chêne pubescent	11		
Méditerranée	Me	Frêne	9	Pins (pin d'Alep, pin à crochets, pin laricio, pin maritime, pin noir, pin pignon, pin sylvestre)	37
		Chêne pubescent	18		
		Chêne vert	15		
Corse	Co	Chêne vert	14	Pin laricio	9
				Pin maritime	9

Tableau 4.2. Essences dominantes en stock dans les forêts françaises identifiées par GRECO. Les essences non dominantes ont été regroupées en deux groupes génériques de résineux et feuillus.

GRECO	Abréviation de la GRECO	Divers feuillus	Divers résineux
		Essence	Essence
Grand-Ouest Cristallin et Océanique	GO	Châtaignier Bouleau Tremble	Douglas Epicéa de Sitka Sapin pectiné
Centre Nord semi-océanique	CN	Châtaignier Bouleau Tremble	Douglas Epicéa commun Sapin pectiné
Grand Est semi-continentale	GE	Grand érable Petit érable Bouleau	Epicéa commun Sapin pectiné Pin sylvestre
Vosges	Vo	Frêne Charme Grand érable	Pin sylvestre Douglas Mélèze d'Europe
Jura	Ju	Chêne sessile Charme Chêne pédonculé	Pin sylvestre Pin noir Douglas
Sud-Ouest océanique	SO	Charme Chêne sessile Chêne tauzin	Pin sylvestre Pin laricio Douglas
Massif Central	MC	Frêne Bouleau Charme	Pin laricio Epicéa de Sitka Pin maritime
Alpes	Al	Châtaignier Frêne Chêne sessile	Pin à crochets Pin d'Alep Pin cembro
Pyrénées	Py	Châtaignier Chêne sessile Robinier faux acacia	Pin à crochets Pin sylvestre Epicéa commun
Méditerranée	Me	Châtaignier Hêtre Chêne-liège	Sapin pectiné Douglas Epicéa commun
Grand-Ouest Cristallin et Océanique	Co	Châtaignier Hêtre Arbousier	Pin d'Alep Genévrier thurifère Sapin pectiné

Tableau 4.3. Trois principales essences en stock des classes « divers feuillus » et « divers résineux » de chaque GRECO.

2.2 Comparaison des prélèvements entre ancienne et nouvelle méthode

Le changement de méthode d'inventaire en 2005 a entraîné la mise en place d'un nouveau protocole de relevé des arbres prélevés, **fondé sur une adaptation radicale du plan de sondage, liée au caractère temporaire depuis l'origine des points d'inventaire :**

- L'ancien protocole (P_AM) consistait à relever les souches des arbres considérés comme ayant été prélevés dans les cinq dernières années précédant l'inventaire des points temporaires, d'après une estimation visuelle de l'âge des souches. **Bien qu'imparfaite et subjective, cette méthode est la seule possible pour un sondage temporaire,**
- Le nouveau protocole (P_NM) repose toujours sur un inventaire à placettes temporaires totalement renouvelées chaque année, mais **la différence majeure est d'opérer un retour sur les points de sondage cinq ans après le premier levé, afin d'inventorier les arbres qui ont été** effectivement prélevés dans l'intervalle (points semi-permanents). C'est donc à un inventaire exact des flux de prélèvement qu'il est procédé.

L'analyse effectuée consiste à comparer le nombre de tige prélevé issus des deux protocoles, sur un même système de point d'inventaires (NM). Cependant, alors que P_AM se focalise sur les cinq années qui précèdent le relevé du point, P_NM prend en compte les prélèvements effectués lors des cinq années qui suivent le relevé du point. **Il y a donc nécessité de comparer ces protocoles sur des domaines forestiers statistiques assez larges,** en se fondant sur l'hypothèse que la quantité de prélèvements, calculée sur un domaine spatial large (*e.g.* à l'échelle du pays ou de la GRECO) est relativement constante sur une période courte (10 ans).

L'analyse est présentée en **Annexe IV.3.**

Les résultats montrent une forte corrélation entre les prélèvements estimés par les deux méthodes. Cependant, les prélèvements du protocole P_NM sont 2,4 fois plus élevés que ceux du protocole P_AM. De plus, la corrélation diminue quand l'étude est stratifiée par type de propriété. Ces fortes variations lorsque l'on stratifie par type de propriété et GRECO montre que cette donnée est peu précise et qu'**il est impossible d'utiliser la variable de prélèvement qui est trop biaisée.** Il est donc indispensable d'estimer ces prélèvements par une autre méthode. Nous utiliserons par la suite un bilan de flux pour calculer les prélèvements (cf. 3.2.3).

3 Matériel et méthodes

La démarche d'analyse est présentée en **Figure 4.2.**

3.1 Choix du matériel d'étude

Notre analyse a été effectuée sur l'inter-cycle défini par les deux premiers inventaires AM disponibles directement en base (*i.e.* hors « archeodendro » et « paleodendro » ; voir partie II - 2.1 ; **Figure 4.3).**

Il a été choisi de travailler sur cette période éloignée, car une analyse parallèle de l'évolution temporelle des flux de bois, se basant sur la comparaison des flux calculés à partir de ces cycles et ceux calculés à partir du dernier cycle AM et du premier cycle NM (forme de dernier inter-cycle disponible), était envisagée (*i.e.* les deux périodes disponibles directement en base les plus éloignées dans le temps). L'étude n'a pu être effectuée, faute de temps.

Comme présenté en 1.2, l'analyse a été effectuée à deux niveaux : sans (niveau 1) ou avec (niveau 2) prise en compte des essences. Les essences utilisées sont les essences identifiées en 2.1.2. L'inventaire forestier historique est un inventaire départemental désynchronisé. **C'est pourquoi les flux restent fondamentalement calculés au niveau des départements.** Chaque département a cependant été rattaché à une approximation de la partition des GRECO (voir partie II - 3.1), l'analyse se fera à ce niveau. Cela permet de diminuer le nombre de strates étudiées (90 départements IFN contre 11 GRECO) et d'avoir une meilleure lisibilité des variations en fonction de conditions écologiques. Les individus statistiques étudiés sont donc représentés par un département et un type de propriété (et une essence au niveau 2). Ces individus sont regroupés en strates définies par une GRECO et un type de propriété (et une essence au niveau 2).

L'année moyenne du début de la période d'étude est 1983 et l'année de fin 1995 (**Tableau 4.4**). La durée moyenne de la période est de 12,5 ans. Seul le département de l'Aude ne comporte qu'un cycle d'inventaire et n'a donc pas pu être étudié.

	moyenne	Ecart-type
Année début	1982,9	3,5
Année fin	1995,3	4,2
Durée	12,5 ans	2,1

Tableau 4.4. Statistiques temporelles sur la période d'étude

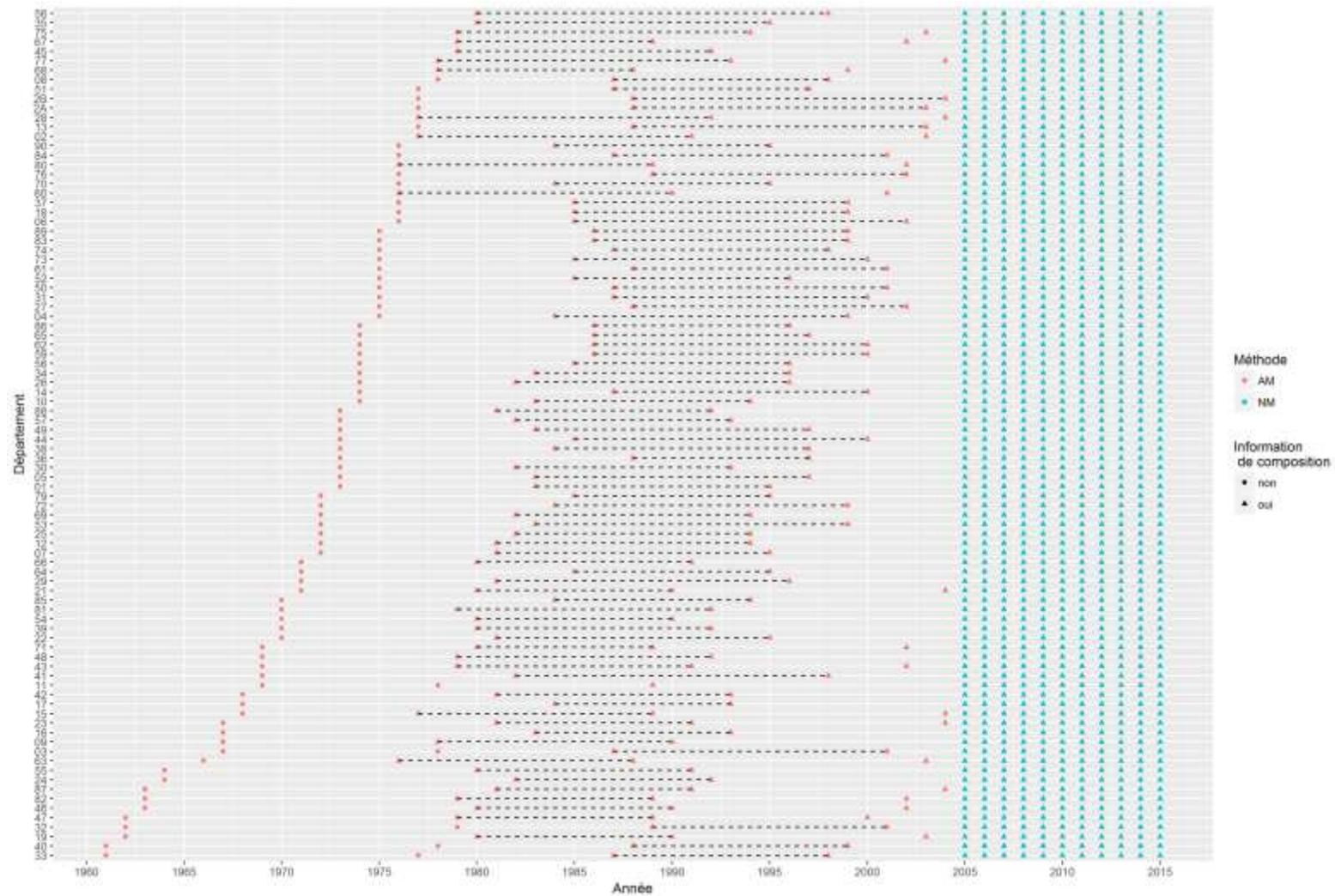


Figure 4.3. Années d’inventaire IFN des départements français et identification de la méthode d’inventaire et de l’existence d’information sur la composition. Ligne en pointillés : période étudiée dans la présente étude. Les départements 75, 78, 91, 92, 93, 94 et 95 sont regroupés sous le numéro 75

3.2 Calcul des flux de bois en surface terrière

L’étude a été effectuée, pour chaque département i , entre deux dates, t_{1i} et t_{2i} . Quatre flux de surface terrière (croissance, recrutement, mortalité et prélèvement) ont été calculés entre ces deux dates. Le flux de croissance correspond à l’augmentation de surface terrière des arbres déjà présents et inventoriés (*i.e.* dont le diamètre à 1,30m est supérieur ou égal à 7,5 cm) au début de l’inter-cycle (à t_{1i}). Le recrutement est l’apport de surface terrière des nouveaux arbres (*i.e.* les arbres qui avaient un diamètre à 1,30m inférieur à 7,5 cm à t_{1i}). La mortalité et les prélèvements représentent des diminutions de surface terrière d’arbres vifs, associées respectivement à la mort ou au prélèvement d’un ou plusieurs arbres pendant la période. Tous les flux sont calculés sur écorce.

L’inventaire forestier français est non permanent, ainsi, l’état à t_{1i} des arbres inventoriés à t_{2i} est inconnu et doit être estimé à partir des données relevées à t_{2i} . Ces données décrivent les 5 ou 10 années précédant l’inventaire et ne couvrent en général pas l’ensemble de la période étudiée (12,5 ans en moyenne ; **Tableau 4.4**). Une estimation de ces données sur la période non couverte a dû être effectuée à partir d’une moyenne entre la donnée relevée à t_{2i} sur l’arbre étudié et la valeur moyenne de cette donnée sur les arbres à t_{1i} de même catégorie (méthode inspirée de Pignard, 1994).

3.2.1 Flux de Croissance et recrutement en surface terrière

Afin de calculer les flux de croissance et de recrutement, pour chaque arbre j du département i , les diamètres sur écorce à t_{1i} ($d_{t1,ij}$) des arbres présents à t_{2i} ont dû être calculés. Pour cela, il a fallu retrancher au diamètre sur écorce de chaque arbre à t_{2i} ($d_{t2,ij}$) l’accroissement radial de l’arbre pendant la période $t_{2i}-t_{1i}$ ainsi que l’accroissement de l’épaisseur de son écorce.

L’accroissement de l’écorce n’est pas renseigné par l’IFN. Une modélisation a permis, pour chaque essence, de relier l’épaisseur de l’écorce (ec) au diamètre (d_{13}) à 1,30m (**Annexe IV.4**).

$$\ln(ec) = a + b \ln(d_{13}) \quad (1)$$

Le diamètre sous écorce ($d_{t2_sec,ij}$) de l’arbre a alors été calculé à partir de son diamètre à 1,30m et l’épaisseur de son écorce ($ec_{t2,ij}$):

$$d_{t2_sec,ij} = d_{t2,ij} - 2 ec_{t2,ij} \quad (2)$$

Une information d’accroissement radial de l’arbre est relevée par l’IFN (IR). Ces IR sont mesurés sur les 5 et 10 dernières années (respectivement IR5 et IR10), ce qui ne couvre généralement pas la période étudiée (en moyenne 12,5 ans ; **Tableau 4.4**). On a donc choisi d’utiliser l’IR10, couvrant une période de temps plus grande, et d’estimer l’accroissement

radial sur le reste de la période lorsque celle-ci était plus large que 10 ans. L'estimation est effectuée en combinant une méthode d'imputation conditionnelle et une interpolation. Ainsi, est calculée la moyenne entre l'IR5 à t_1 ($IR5_{t1ij}$) des arbres appartenant à la même essence, au même département, à la même propriété foncière et à la même classe de diamètre que l'arbre étudié et l'IR10 à t_2 de l'arbre ($IR10_{t2ij}$). Dans le cas où une telle moyenne n'était pas calculable car aucun arbre de même catégorie n'était relevé, la catégorie a été élargie en supprimant d'abord le critère de classe de diamètre, puis celui d'essence si nécessaire. Pour chaque arbre j , le diamètre sous écorce à t_1 ($d_{t1_sec,ij}$) a ainsi été calculé à partir de $d_{t2_sec,ij}$.

Si $t_2 - t_1 < 10$:

$$d_{t1_secij} = d_{t2_secij} - 2 \frac{IR10_{t2ij}}{10} (t_2 - t_1) \quad (3)$$

Si $t_2 - t_1 \geq 10$ (**Figure 4.4**) :

$$d_{t1_secij} = d_{t2_secij} - 2 IR10_{t2ij} - \left(\frac{IR10_{t2ij}}{10} + \frac{IR5_{t1ij}}{5} \right) (t_2 - t_1 - 10) \quad (4)$$

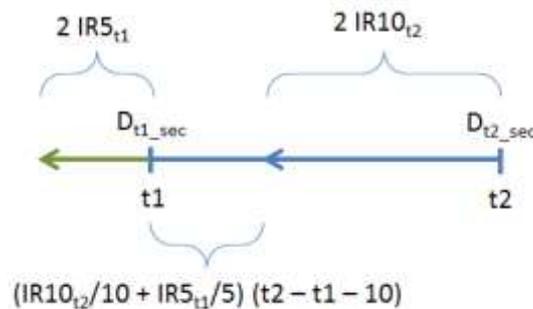


Figure 4.4. Schéma du calcul du diamètre sous écorce à t_1 ($dt1_sec$) d'un arbre donné à partir du diamètre sous écorce à t_2 ($dt2_sec$) lorsque la période t_2-t_1 est supérieure à 10 ans. L'IR10 t_2 correspond à l'IR10 à t_2 de l'arbre étudié. L'IR5 t_1 correspond à la moyenne de l'IR5 des arbres présents à t_1 appartenant à la même essence, au même département, à la même propriété foncière et à la même classe de diamètre que l'arbre étudié

Dans le cas où ni l'IR5, ni l'IR10 n'étaient renseignés, l'IRN (accroissement radial sur N années, N étant inférieur à 5) a été utilisé (**Annexe IV.5**)

Enfin, d_{t1ij} a été calculé grâce à la relation (1) :

$$d_{t1ij} = d_{t1_secij} + 2 e^{a+b \ln(d_{t1_secij})} \quad (5)$$

Un d_{t1ij} inférieur à 7,5 cm (limite de recensabilité de l'arbre) correspond à un arbre qui a été recruté sur la période. Le flux de recrutement correspond donc à la surface terrière à $t2_i$ de ces arbres qui ont un d_{t1ij} inférieur à 7,5 cm.

$$Rt = \sum \pi \frac{d_{t2ij}^2}{4} \quad (6)$$

Si d_{t1ij} est supérieur à 7,5 cm, l'arbre n'a pas été recruté sur la période. Le flux de croissance est donc défini comme l'accroissement de surface terrière de ces arbres.

$$CR = \sum \pi/4 (d_{t2ij}^2 - d_{t1ij}^2) \quad (7)$$

3.2.2 Flux de Mortalité en surface terrière

Selon le protocole d'inventaire, les arbres morts sont relevés seulement s'ils sont réputés être morts dans les 5 dernières années. **La présence de ces arbres, et la faible taille de ce flux, rend cette estimation moins erratique que celle des prélèvements, bien que la question d'une appréciation subjective pose aussi question.** Cependant, seule la circonférence à la base (C_0) est relevée. Une modélisation a permis de relier, pour chaque essence, la circonférence à la base à celle à 1,30 m (C_{13} ; **Annexe IV.4**) :

$$\ln(C_{13}) = a + b \ln(C_0) \quad (8)$$

Au même titre que l'accroissement radial de l'arbre, les cinq ans ne couvrent pas la totalité de la période d'étude. Une interpolation entre la mortalité sur les 5 années avant $t2_i$ et celle sur les cinq années avant $t1_i$ a donc été effectuée afin d'estimer la mortalité sur la période d'étude non couverte par l'estimation de la mortalité à $t2_i$. La mortalité (Mt), surface terrière des arbres qui sont morts entre $t1_i$ et $t2_i$ et qui n'ont pas été prélevés, correspond donc à la mortalité relevée sur le terrain sur les 5 années avant $t2_i$ et la mortalité calculée sur le reste de la période.

La mortalité à $t1_i$ a à nouveau été estimée par imputation conditionnelle, en effectuant une moyenne de la mortalité dans chaque classe département x année d'inventaire x propriété x essence. Dans le cas où une telle moyenne n'était pas calculable car aucun arbre de même classe n'était relevé, la catégorie a été élargie en enlevant d'abord le critère d'essence puis celui de propriété si nécessaire.

3.2.3 Flux de prélèvement en surface terrière

Les prélèvements mesurés par l'inventaire avant la mise en place des retours sur points sont sous-estimés (Annexe IV.3). **Il faut donc reconstituer ces prélèvements, ce qui signifie être le plus précis possible sur l'estimation des autres flux dans le bilan du stock en surface terrière.** Sachant que l'on connaît la surface terrière à t_{1i} et à t_{2i} (respectivement, $G_{t_{1i}}$ et $G_{t_{2i}}$), il est possible, par un bilan de conservation de la matière sur écorce d'obtenir une estimation des prélèvements (P_t) effectués sur la période :

$$G_{t_{2i}} = G_{t_{1i}} + CR + Rt - Mt - Pt \quad (9)$$

$$Pt = G_{t_{1i}} + CR + Rt - Mt - G_{t_{2i}} \quad (10)$$

Les prélèvements en surface terrière, calculés à partir de la méthode du bilan ont été comparés à ceux relevés directement sur le terrain. La corrélation entre les deux au niveau département x propriété est de 0,86 (Figure 4.5). **Une régression linéaire a montré que les flux calculés sont 2,2 fois plus élevés que ceux relevés.** Ces résultats rappellent ceux issus de la comparaison des prélèvements en nombre de tiges relevés par les protocoles AM et NM et confortent ainsi nos résultats (Annexe IV.3).

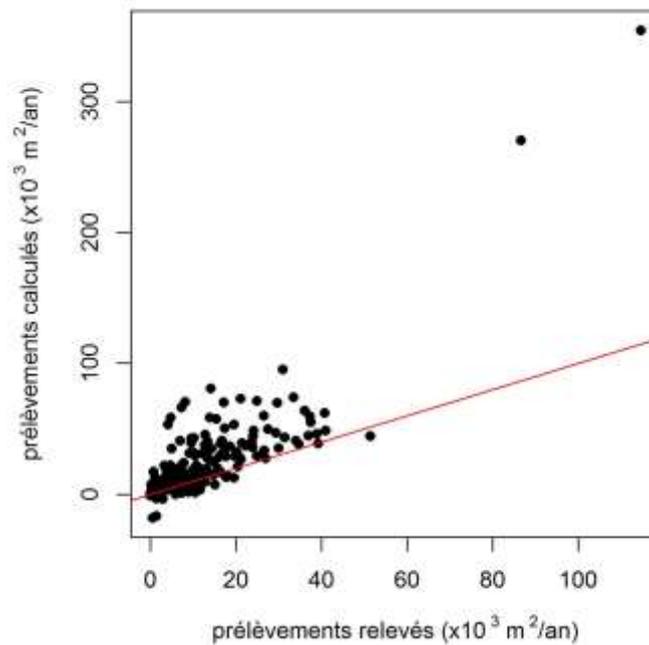


Figure 4.5. Comparaison entre les prélèvements en surface terrière (m²) calculés par la méthode du bilan et ceux relevés sur le terrain par l'inventaire. La droite rouge est la droite de la fonction identité.

3.2.4 Standardisation des flux de bois en taux démographiques

L'inventaire AM étant désynchronisé et la durée d'un inter-cycle étant non constante, il a été décidé de travailler avec des flux annualisés afin de pouvoir les comparer entre eux.

Pour pouvoir comparer les différents flux entre strates, il a été décidé de standardiser les flux (flux relatifs). Ainsi, les flux ont été rapportés à la surface forestière initiale de la strate pour les variations de surface forestière (var_surf_S1 ; **Tableau 4.5**), à la surface terrière initiale pour la croissance (CR_G1), le prélèvement (Pt_G1) et la mortalité (Mt_G1) ou aux deux quantités pour le recrutement (notés Rt_S1 pour le recrutement rapporté à la surface forestière initiale et Rt_G1 pour celui rapporté à la surface terrière initiale de la strate) qui est un flux pouvant dépendre de l'extension des surfaces forestières.

Code flux	Flux de bois
CR_G1	Croissance rapportée à la surface terrière initiale
Pt_G1	Prélèvement rapporté à la surface terrière initiale
Mt_G1	Mortalité rapportée à la surface terrière initiale
Rt_G1	Recrutement rapporté à la surface terrière initiale
Rt_S1	Recrutement rapporté à la surface forestière initiale
var_surf_S1	Variation de surface forestière rapportée à la surface forestière initiale

Tableau 4.5. Codification des flux de bois relatifs annualisés utilisés dans l'étude. En gris : les deux flux non étudiés au niveau 2 de l'analyse (niveau prenant en compte les essences d'arbres).

3.3 Représentation des flux de bois, problème des prélèvements négatifs

Les flux de bois ont été représentés par des diagrammes en barres. Leur position par rapport à l'horizontale indique leur signe, afin d'apprécier visuellement l'équilibre entre les flux d'augmentation et de diminution du stock de bois.

Ces diagrammes montrent que parmi tous les flux de bois, la mortalité est généralement le plus faible et, parmi les flux positifs, les recrutements sont généralement plus faibles que la croissance (exemple **Figure 4.6**).

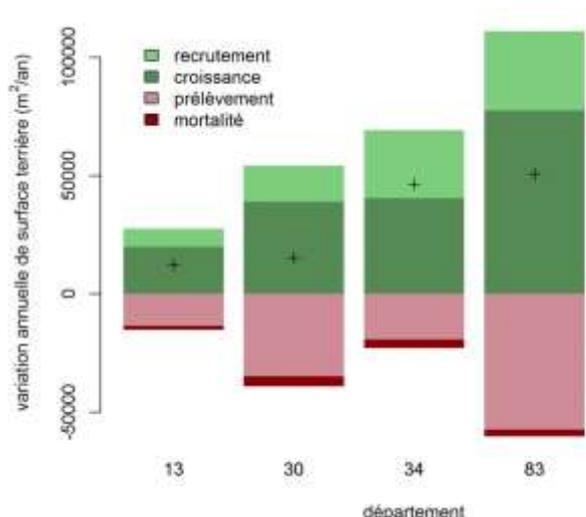


Figure 4.6. Un exemple de diagramme de flux de bois pour les forêts privées de la GRECO méditerranéenne. (+) indique le sens de variation du stock de bois sur la période étudiée. Les départements sont renseignés par leur numéro administratif.

L'ensemble des diagrammes sont présentés en **Annexe IV.6**.

Pour plusieurs individus de l'analyse, il a été possible d'identifier des prélèvements de signe négatif (représentés alors du côté des flux positifs sur les diagrammes ; exemple **Figure 4.7**), ces derniers n'étant pas estimés directement, mais par la fermeture d'un **bilan matière**. Cela constitue une aberration et a donc nécessité une étude approfondie afin de comprendre leur origine.

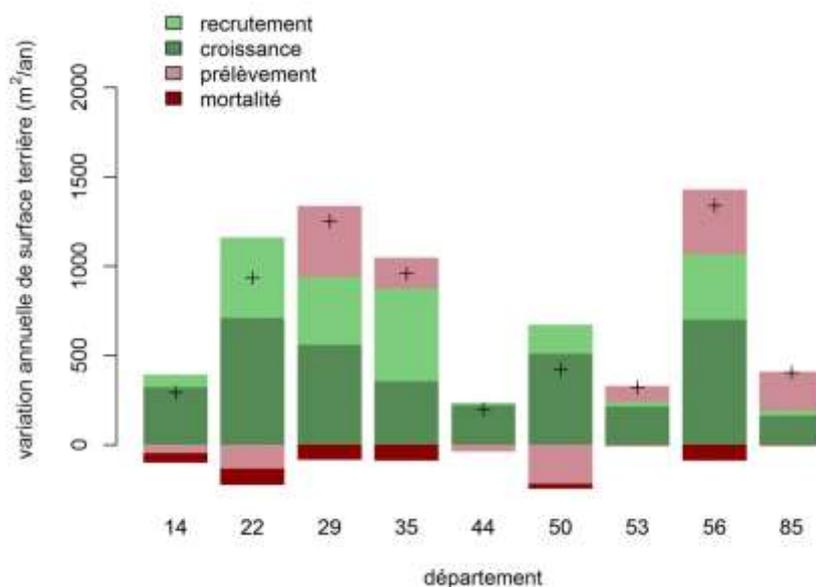


Figure 4.7. Diagramme des flux pour les forêts communales de la GRECO Grand Ouest. (+) représente la variation de surface terrière de la strate sur la période étudiée. Les départements sont renseignés par leur numéro administratif.

Afin de mieux comprendre l'origine des flux de prélèvement négatifs, une analyse de leur occurrence a été effectuée (**Tableau 4.6**). On remarque que les prélèvements négatifs ne s'observent pas dans toutes les GRECO, mais essentiellement dans le Grand-Ouest (18,5% des couples département – propriété présentent des prélèvements négatifs ; **Tableau 4.6**) et Corse (66,7%).

Parmi les types de propriété, **les forêts communales présentent plus de prélèvements négatifs (14.6%) que les domaniales (3,4%) et les privées (2,2%). Une première hypothèse serait de supposer un lien avec la soumission des forêts communales au régime forestier.** En effet, ne sont catégorisées « forêts communales » que les forêts communales soumises effectivement à la date d'inventaire. La soumission éventuelle de forêts entre les dates t_{1i} et t_{2i} , par le transfert de forêt depuis les strates « forêt privée » vers « forêt communale », entraîne une augmentation de stock de surface terrière provenant de forêts n'étant pas inventoriées dans cette catégories à t_{1i} . Le stock sur pied à t_{1i} correspondant à celui observé à t_{2i} , $G'_{t_{1i}}$ serait donc égal à $G_{t_{1i}} + \alpha$, α correspondant à la surface terrière ajoutée par soumission. Ainsi, si l'on note Pt' les prélèvements réels et Pt les prélèvements sous hypothèse de stabilité de la propriété, on obtient :

$$Pt' = G'_{t_{1i}} + CR + Rt - Mt - G_{t_{2i}} \quad (11)$$

$$Pt' = G_{t_{1i}} + \alpha + CR + Rt - Mt - G_{t_{2i}} = Pt + \alpha \quad (12)$$

$$Pt = Pt' - \alpha \quad (13)$$

A la condition que $\alpha > Pt'$, les prélèvements peuvent devenir négatifs.

La forte occurrence de prélèvements négatifs en Corse (66,7%) et en méditerranée (6,7%) **conduit à une seconde hypothèse, qui serait que ces prélèvements négatifs seraient, en partie, causés par une sous-estimation de la croissance radiale du chêne vert par les mesures sur le terrain**, dont la lecture des cernes reste très difficile au point que les mesures de cernes viennent d'être abandonnées pour cette espèce (Mérian et Hervé, 2014). La croissance radiale est utilisée dans le calcul du flux de croissance et de recrutement. Ainsi, si l'on note CR' et Rt' , respectivement, la croissance et le recrutement réels, et β la différence de surface terrière associée à la sous-estimation des mesures de terrain, on a :

$$CR' + Rt' = CR + Rt + \beta \quad (14)$$

De même que précédemment, on obtient :

$$Pt' = G_{t_{1i}} + CR' + Rt' - Mt - G_{t_{2i}} \quad (15)$$

$$Pt' = G_{t1i} + CR + Rt + \beta - Mt - G_{t2i} \quad (16)$$

$$Pt = Pt' - \beta \quad (17)$$

A la condition que $\beta > Pt'$, les prélèvements peuvent devenir négatifs.

Au vu de la proportion très importante de prélèvements négatifs en Corse (**Tableau 4.6 ; Annexe IV.6**), il a été décidé d'écarter cette GRECO de notre étude par la suite.

GRECO	Propriété (% GRECO)			Total (%)	Essences principales (part du volume dans la GRECO)
	Domanial	Communal	Privé		
Grand-Ouest	0	55.5	0	18.5	Chêne pédonculé (21.0%) Chêne sessile (11.2%) Pins (17.1%) Châtaignier (11.0%)
Centre Nord	0	20.83	0	6.9	Chêne sessile (26.0%) Chêne pédonculé (18.9%) Pins (10.6%)
Grand-Est	0	0	0	0	Chêne sessile (17.9%) Hêtre (16.5%) Chêne pédonculé (13.5%) Charme (11.8%)
Vosges	0	0	0	0	Sapin pectiné (22.4%) Hêtre (18.8%) Epicéa commun (18.0%)
Jura	0	0	0	0	Epicéa commun (22.8%) Sapin pectiné (20.7%) Hêtre (15.6%)
Sud-Ouest	10	10	0	6.7	Pin maritime (35.9%) Chêne pédonculé (17.6%) Chêne pubescent (15.4%)
Massif Central	8.3	0	0	2.6	Douglas (12.4%) Sapin pectiné (12.3%) Chêne pédonculé (11.02%) Hêtre (10.3%) Pin sylvestre (9.7%)
Alpes	0	0	0	0	Epicéa commun (21.1%) Pin sylvestre (13.4%) Hêtre (12.9%) Sapin pectiné (12.5%)
Pyrénées	0	0	0	0	Hêtre (24.3%) Chêne pédonculé (14.6%) Sapin pectiné (11.3%)
Méditerranée	0	20	0	6.7	Chêne pubescent (16.0%) Pins (32.6%) Chêne vert (12.9%)
Corse	50	50	100	66.7	Chêne vert (29.3%) Pin maritime (19.8%) Pin laricio (18.9%)
Total	3.4	14.6	2.2	6.8	

Tableau 4.6. Occurrence des prélèvements négatifs par GRECO et propriété. Les flux sont calculés au niveau des individus département x propriété. L'occurrence est calculée en pourcentage du nombre de fois qu'un prélèvement négatif est observé dans la strate GRECO x propriété.

3.4 Analyse de la variabilité intra-strate des flux de bois en fonction de la taille des strates de l'analyse et sélection des individus

La surface terrière totale des individus département – propriété a été calculée. La distribution du pourcentage cumulé de la surface terrière des individus rangés par taille décroissante montre une forte queue de distribution constituée d'individus ayant une part très faible dans la surface terrière initiale totale (**Figure 4.8**). Cette faible « taille » peut avoir un effet sur nos calculs de flux si elle est trop faible, lié à la taille du domaine statistique couvert par les points d'inventaire.

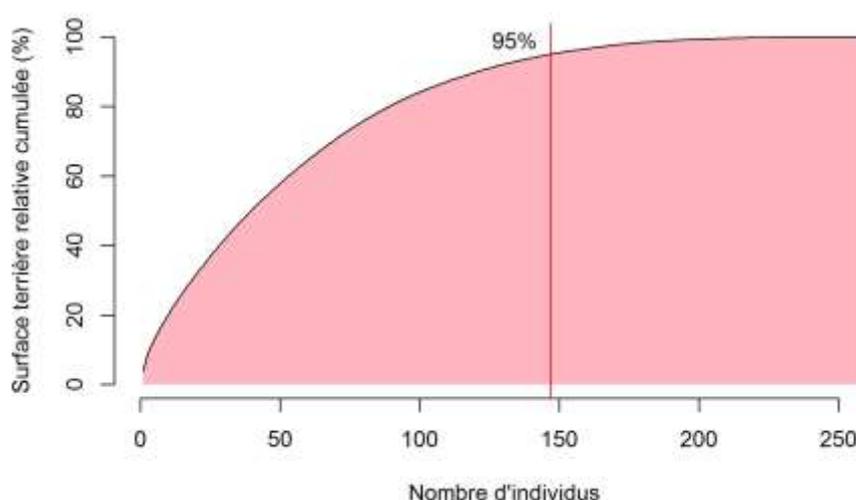


Figure 4.8. Surface terrière relative cumulée en fonction du nombre d'individus département-propriété, rangés par taille décroissante de surface terrière. La droite rouge représente le nombre d'individus nécessaire pour atteindre 95% de la surface terrière.

Nous avons analysé l'effet de la taille des strates sur la variabilité des flux. Pour cela, un coefficient de variation intra-strate (écart-type divisé par la moyenne) a été calculé pour chaque strate GRECO x propriété et chaque flux. La corrélation entre ces coefficients et la surface terrière initiale ainsi que la surface forestière initiale a été étudiée (**Figures 4.9 et 4.10**). La corrélation entre les différents flux et la surface terrière initiale et la surface forestière initiale a été étudiée en utilisant un test de Spearman (**Tableau 4.7**).

Aucune corrélation significative n'a été trouvée. Cependant, pour le recrutement et la croissance, une tendance très nette, en limite de significativité montre qu'il existe un effet négatif de la taille du domaine statistique (en surface terrière et en surface) sur ces deux variables. Les groupes présentant une faible surface terrière sont plus hétérogènes.

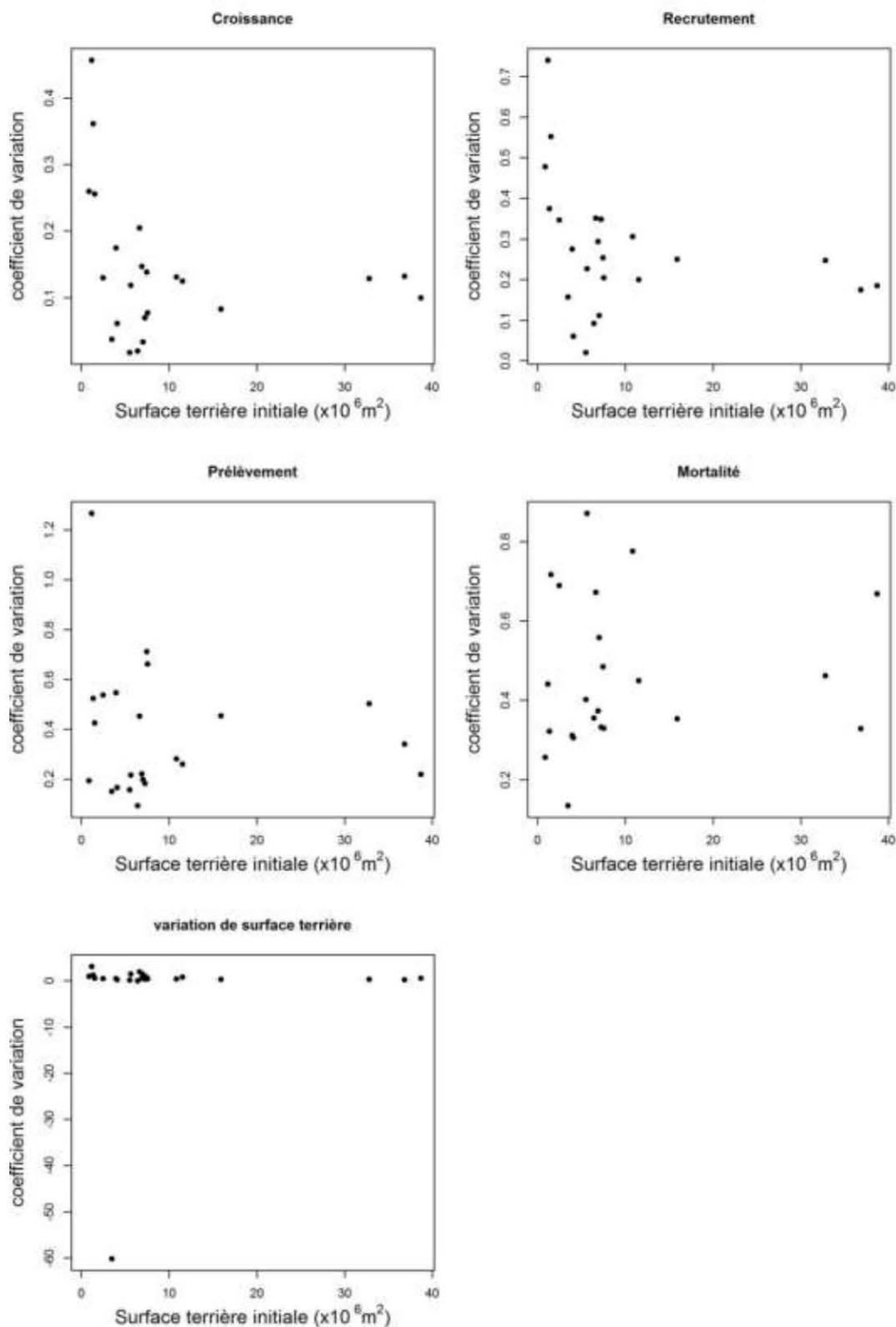


Figure 4.9. Coefficient de variation intra strate (GRECO-propriété) en fonction de la surface terrière initiale totale de la strate. Cette analyse intra-strate repose sur la variabilité inter-départementale.

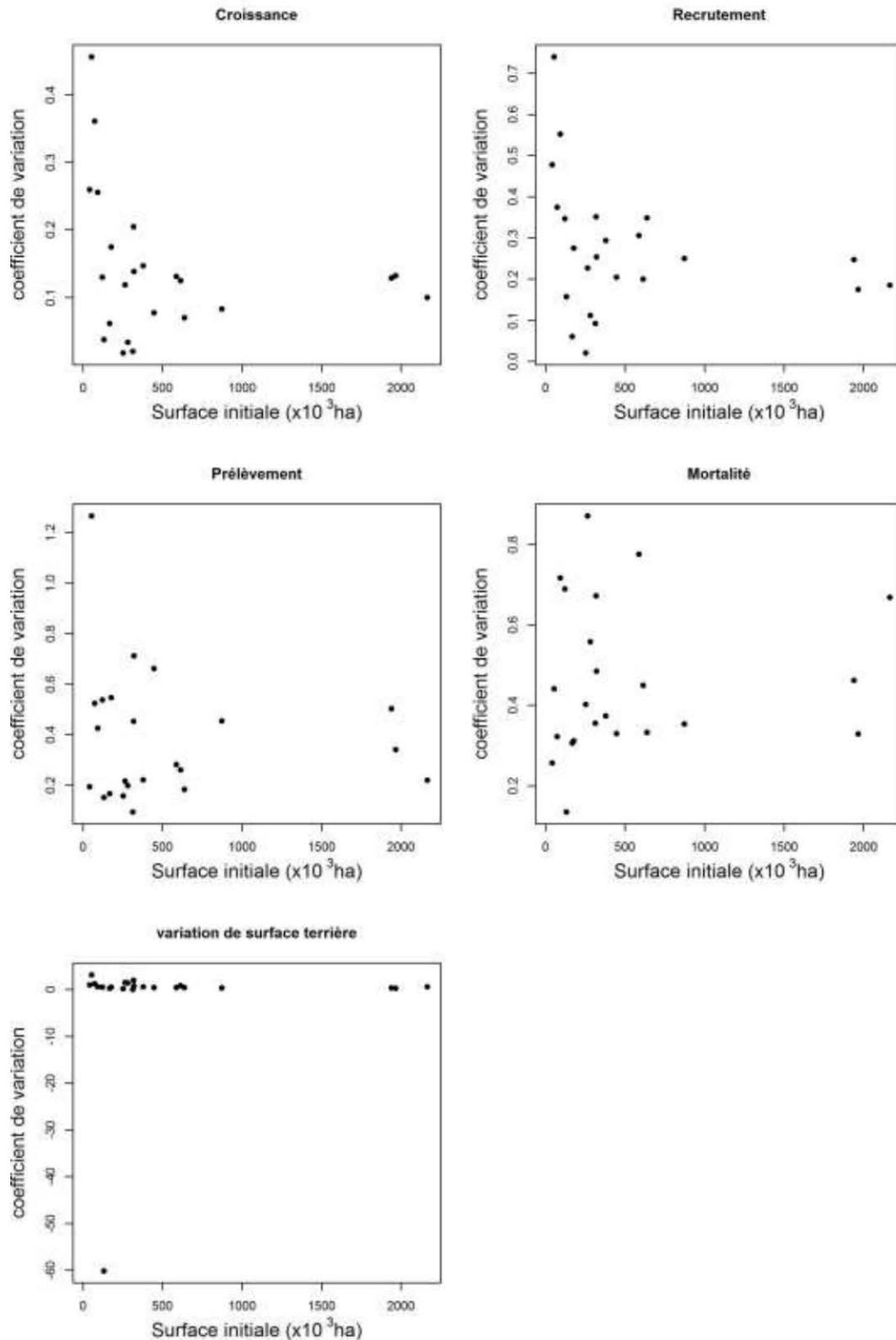


Figure 4.10. Coefficient de variation de chaque flux par GRECO-propriété en fonction de la surface forestière initiale totale de la strate. Cette analyse intra-strate repose sur la variabilité inter-départementale.

	Corrélation avec Gt1		Corrélation avec St1	
	corrélation	probabilité critique (p)	corrélation	probabilité critique (p)
CR	-0.34	0.11	-0.32	0.13
Rt	-0.41	0.05	-0.34	0.11
Pt	0.03	0.88	-0.00	0.99
Mt	0.23	0.30	0.18	0.40
dG	-0.25	0.24	-0.28	0.19

Tableau 4.7. Corrélation de Spearman entre les différents flux de stock sur pied et la surface terrière initiale (Gt1) et la surface initiale (St1) du groupe GRECO-propriété. Mt : mortalité. CR : croissance. Pt : prélèvement. Rt : recrutement. dG : variation de surface terrière

Pour éviter une forte variabilité intra-strate liée aux strates de surface terrière faible, il aurait été possible d'écarter les strates de faible surface terrière mais cela revenait à écarter un grand nombre de strates. Il a donc été décidé d'écarter les individus de faible surface terrière afin de **représenter 95% de la surface terrière initiale totale de la forêt française** en minimisant le nombre de strates. **Ainsi, sur les 260 individus département x propriété hors Corse, l'étude ne se focalise que sur les 147 individus les plus importants (Annexe IV.7).**

Ce choix est conforté par le fait qu'en écartant ces individus, on se focalise déjà sur 94,8% de de l'augmentation du stock mesurée pour les inter-cycles d'inventaire étudiés (Figure 4.11). Fait intéressant, les individus départements x propriété présentant des flux de prélèvement négatifs ne sont que des individus à faible surface terrière et sont alors écartés par cette sélection. En plus de l'effet de la soumission des forêts communales et de la lecture des cernes de certaines essences, il serait donc possible que la faible taille des individus ait eu un effet sur les calculs de prélèvements.

Au deuxième niveau d'étude (département x propriété x essence), l'analyse s'est portée sur les individus département x propriété précédemment retenus (représentant 95% de la surface terrière initiale, hors Corse), et de la même manière que précédemment, **les nouveaux individus département x propriété x essence (DPE) présentant un poids faible dans la surface terrière initiale ont été éliminés, en ne retenant que les individus permettant de représenter 95% du stock total en surface terrière** (692 individus sur les 1109 ; Annexe IV.8). **On représente ainsi 90% du stock initial et 80% de l'expansion en surface terrière de la France métropolitaine (hors Corse).**

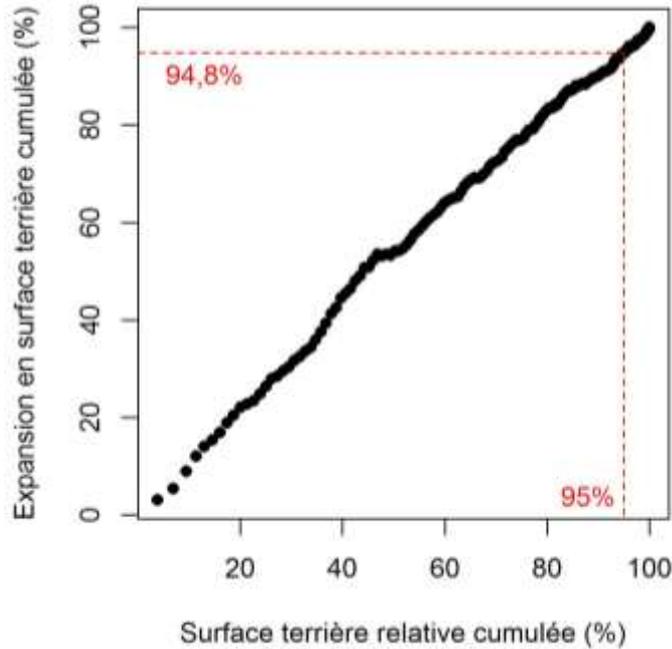


Figure 4.11. Part dans l'expansion cumulée en fonction de la surface terrière relative cumulée au niveau 1 de l'analyse (GRECO x propriété)

3.5 Stratégie d'analyse des flux

3.5.1 Analyse des corrélations au niveau des individus département x propriété

Une première analyse globale des flux a été effectuée au niveau des individus département x propriété, niveau auquel ils sont calculés. Cette analyse a consisté à étudier les corrélations entre ces flux mais aussi la corrélation entre ces flux et l'expansion en stock de ces individus. L'expansion a été étudiée sous deux angles : la part de l'individu dans l'expansion totale et l'« **intensité d'expansion** », définie comme le ratio entre la part de l'individu dans l'expansion totale (P_e) et la part que représentait l'individu dans la surface terrière initiale totale (P_0).

$$IE = \frac{P_e}{P_0} \quad (18)$$

Cette analyse permet d'avoir une première vision simple du lien entre nos variables d'étude et la dynamique d'expansion.

3.5.2 Analyse en composante principale et classification

3.5.2.1 Analyse en composante principale

Aux deux niveaux d’étude (département x propriété et département x propriété x essence), le nombre d’individus étant important (respectivement 147 et 692) et l’analyse portant sur plusieurs variables (respectivement 6 et 4 ; **Tableau 4.5**), il a été choisi d’utiliser une Analyse en Composante Principale (ACP) à partir de ces flux afin d’étudier le lien entre les variables et les similitudes entre les individus. Les variables de cette ACP étant d’unités différentes, elles ont été centrées et réduites (ACP normée ou ACPn) et un poids, correspondant à la surface terrière initiale de la strate, a été attribué à chaque individu afin de ne pas donner trop d’importance aux individus de faible surface terrière.

Ainsi, deux ACPn ont été effectuées : une pour chaque niveau d’étude. Le premier niveau a l’avantage de permettre d’étudier les variations de surface alors que le deuxième, apportant un niveau d’information supérieur, ne permet pas l’étude des surfaces.

Ajout de variables supplémentaires au niveau département x propriété

L’intensité d’expansion a été calculée pour chaque individu département x propriété et a été scindée en quatre classes (IE négative, IE entre 0 et 1, entre 1 et 2 et supérieure à 2 ; **Figure 4.12**). Cette variable ainsi que sa version qualitative a été introduite en variable supplémentaire de l’ACP, respectivement, quantitative et qualitative.

De même, le stock à l’hectare (VS), défini comme la surface terrière totale de la strate rapportée à sa surface, a été calculé pour chaque individu département x type de propriété et a été scindé en quatre classes (0-15, 15-20, 20-25, 25-30 ; **Figure 4.13**). Le stock à l’hectare a été ajouté comme variable quantitative supplémentaire, ainsi que sa version qualitative.

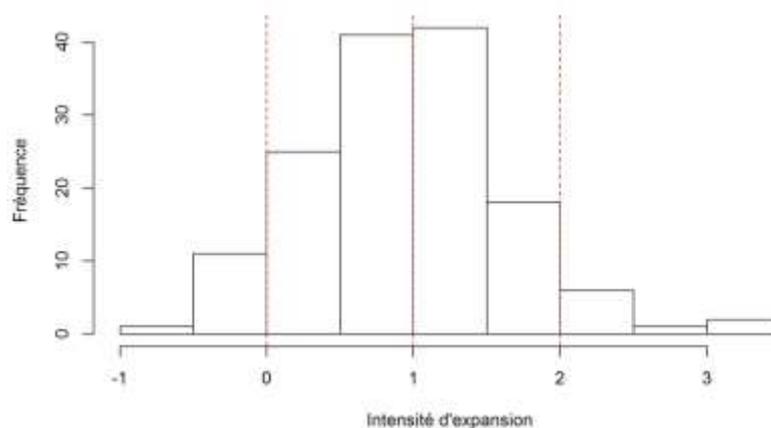


Figure 4.12. Histogramme de l’intensité d’expansion en surface terrière pour l’ensemble des individus statistiques de l’analyse de niveau 1 (GRECO x propriété). 147 individus dans 25 strates propriété x GRECO. La discrétisation du stock à l’hectare est figurée.

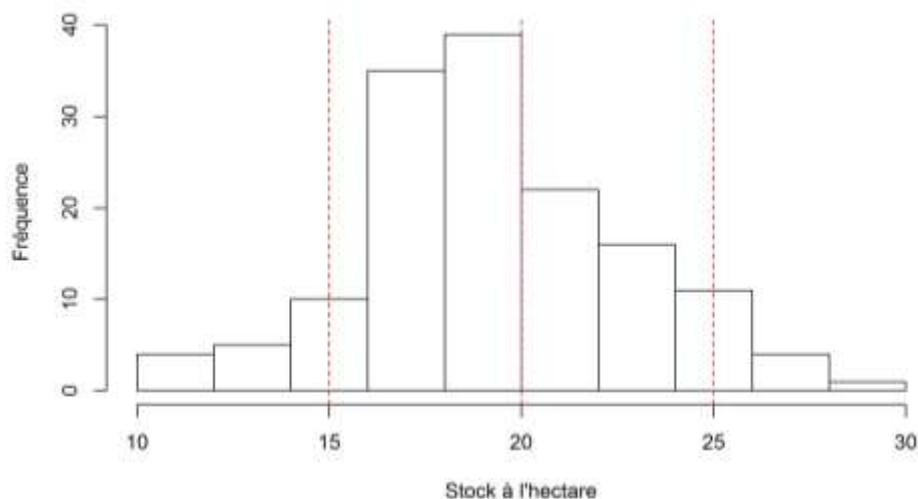


Figure 4.13. Histogramme du stock à l'hectare en surface terrière pour l'ensemble des individus statistiques de l'analyse de niveau 1 (GRECO x propriété). 147 individus sur 25 strates GRECO x propriété. La discrétisation du stock à l'hectare est figurée.

3.5.2.2 Typologie des strates forestières fondée sur les flux de bois

Les individus statistiques étant nombreux, une typologie a été raisonnée au niveau des strates regroupant ces individus (c'est-à-dire agrégeant les départements d'une même GRECO) par souci de lisibilité. Pour chaque niveau d'étude, les coordonnées des centres de gravité des strates sur les premières composantes principales ont servi de base à une approche par classification ascendante hiérarchique.

A partir de cette classification, des « **facies dynamiques** », **définis comme un groupe de strates présentant des dynamiques similaires**, ont été créés (7 au niveau 1 et 14 au niveau 2). Le nombre de classe a été définie de façon subjective afin de représenter à la fois la diversité de la forêt française mais aussi de permettre une lecture relativement aisée des dynamiques. L'analyse des différents facies a permis des regroupements, *a posteriori*, de facies présentant des dynamiques similaires.

3.5.3 Information auxiliaire des profils diamétriques au niveau 2 de l'analyse

La structure diamétrique du stock de bois renseigne sur le stade de maturation des forêts. Cette information est donc essentielle pour comprendre le profil dynamique des strates forestières. Par exemple, une absence de prélèvement dans une forêt nouvelle, composée principalement de d'arbres de faibles diamètres, ou dans une forêt mature, n'aura pas le même sens. Dans le premier cas, on est dans une phase de maturation d'une forêt potentiellement gérée alors que dans le deuxième, on est dans le cas d'une forêt mature non gérée.

Afin de caractériser les structures présentes au sein des strates GRECO x propriété x essence, et pas seulement la structure diamétrique moyenne, nous avons constitué **une typologie de**

profils diamétriques sur les individus département x propriété x essence (DPE), à partir d'une classification définie par les classes de taille de bois de l'IFN: petit bois (PB ; entre 7,5 et 22,5 cm), bois moyen (BM ; entre 22,5 et 37,5 cm), gros bois (GB ; entre 37,5 et 52,5 cm) et très gros bois (TGB ; diamètre supérieur à 52,5 cm). L'approche est présentée dans l'**annexe IV.9**. Elle a permis d'identifier 5 profils diamétriques (**Figure 4.14**). **Pour chaque strate GRECO x propriété x essence, la part des changements en surface terrière peut alors être ventilée selon chaque profil diamétrique.**

Trois profils présentent des structures à faibles diamètres (profils 1, 2 et 3 ; **Figure 4.14**). On remarque une augmentation de la part des BM, GB et TGB entre le 1 et le 2 et entre le 2 et le 3. Le profil 4 est celui qui est le plus équilibré dans chaque classe de diamètre. Le profil 5 présente des forêts matures, dont les parts des GB et des TGB sont les plus importantes.

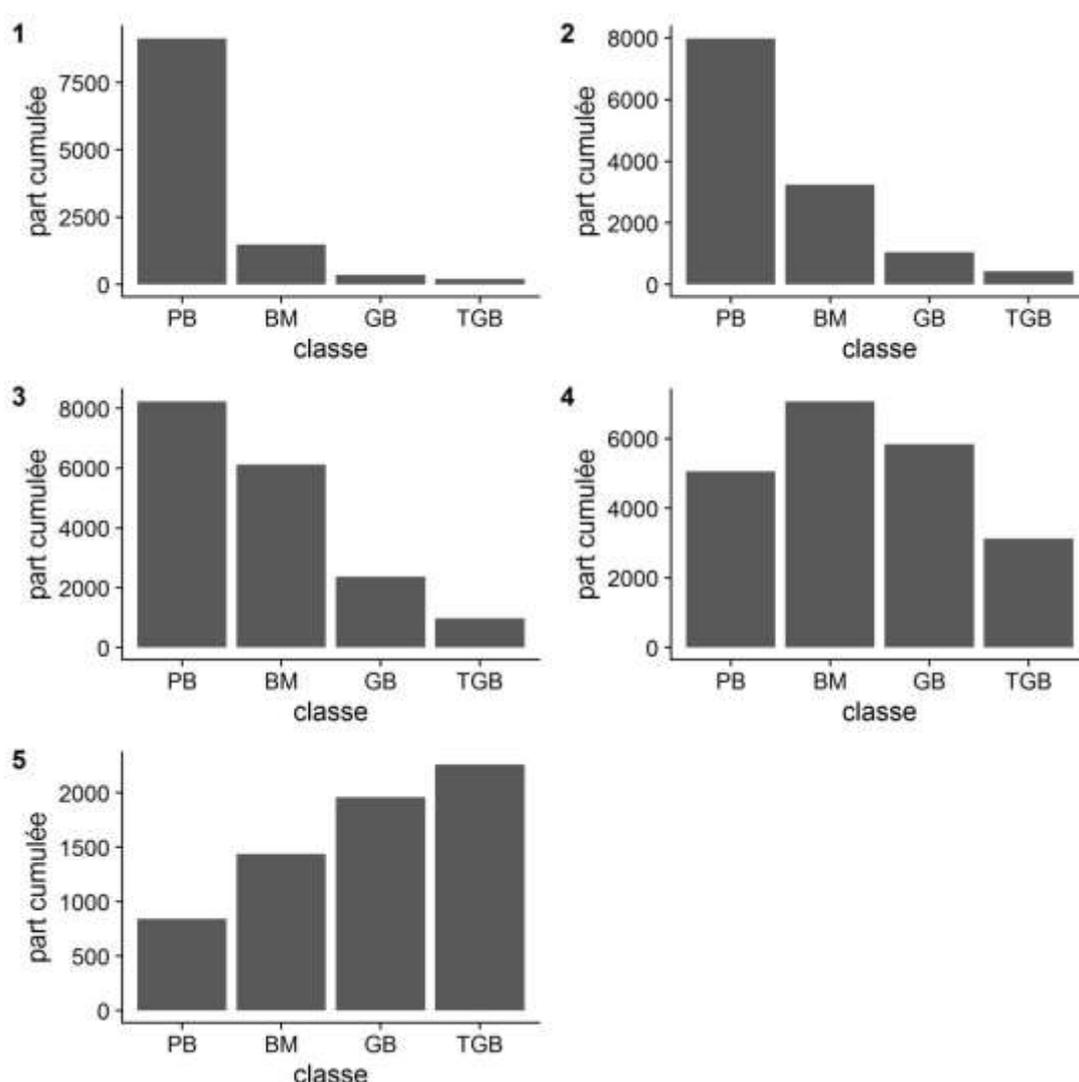


Figure 4.14. Profils diamétriques identifiés par classification. PB : petit bois (entre 7,5 et 22,5 cm) ; BM : bois moyen (entre 22,5 et 37,5 cm) ; GB : gros bois (entre 37,5 et 52,5 cm) ; TGB : très gros bois (supérieur à 52,5 cm). Les diamètres sont mesurés à 1,30 m.

4 Résultats

4.1 Analyse de la corrélation entre les flux et l'expansion au niveau des individus définis par les départements et la propriété

Une première analyse des flux de bois au niveau des départements a été effectuée afin d'avoir une première vision globale des corrélations entre flux et de celle entre ces flux et les changements de stock.

On observe une forte corrélation entre Rt_S1 et Rt_G1 (corrélation de 0,90, $p < 0,001$; **Figure 4.15** ; **Tableau 4.8**) ainsi qu'une plus faible mais toujours forte corrélation entre la croissance et le recrutement (corrélation de 0,73 entre CR_G1 et Rt_G1 et de 0,66 pour CR_G1 et Rt_S1 ; $p < 0,001$). **De façon spectaculaire, on remarque également qu'aucune corrélation n'est observée entre la croissance et le prélèvement à un niveau très agrégé intra-propriété, ce qui suggère l'existence de contrastes importants pour cette relation au sein de la forêt française.**

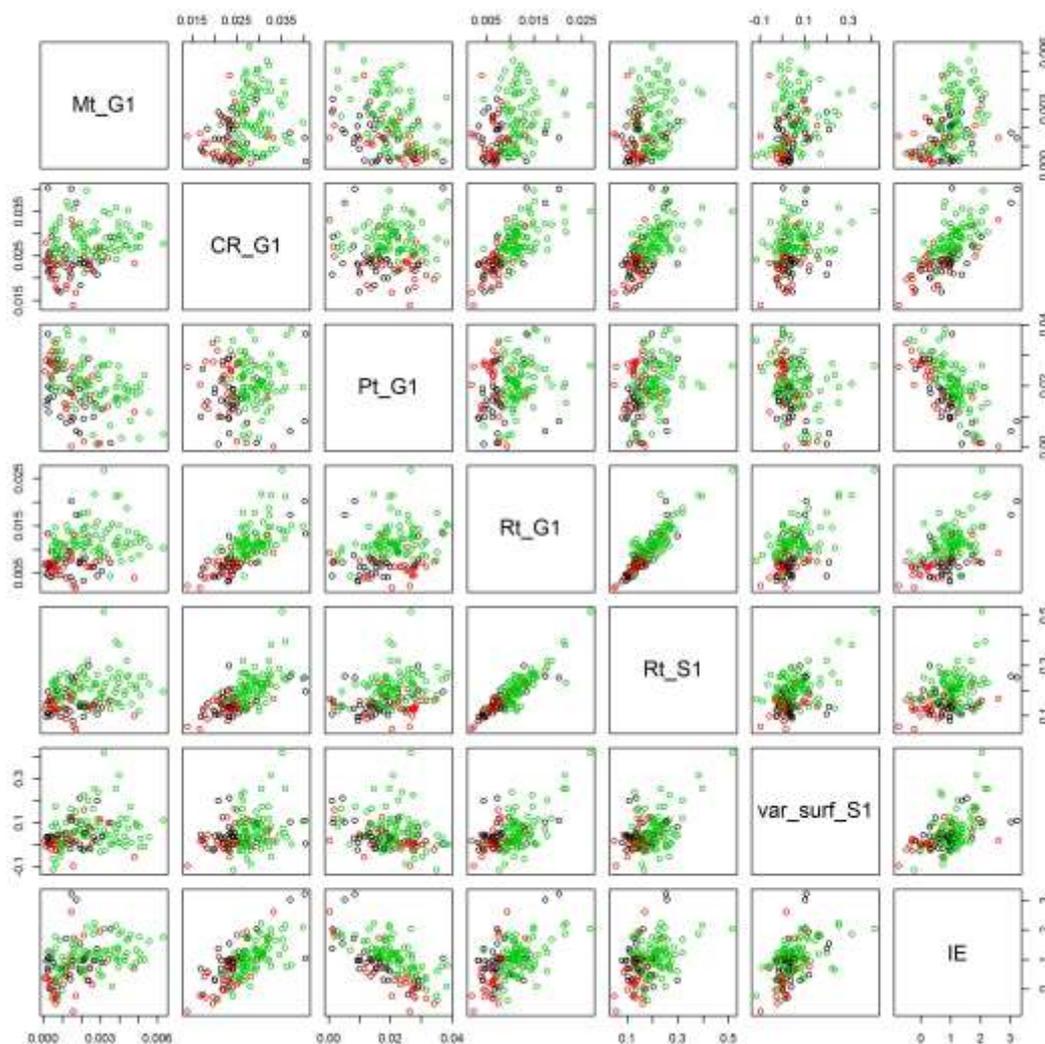


Figure 4.15. Matrice des corrélations entre les différents flux relatifs démographiques et selon le type de propriété. En noir, les forêts communales, en rouge les forêts domaniales et en vert les forêts privées. IE: Intensité d'expansion = ratio de la part d'expansion en surface terrière à la part de la surface terrière des individus.

	CR_G1	Pt_G1	Rt_G1	Rt_S1	Var_surf_S1	IE	Part dans l'expansion
Mt_G1	0,27***	-0,37***	0,32***	0,30***	0,27***	0,41***	0,45***
CR_G1		0,02	0,73***	0,66***	0,30***	0,70***	0,56***
Pt_G1			0,20*	0,29***	-0,27***	-0,65***	-0,25**
Rt_G1				0,90***	0,55***	0,53***	0,37***
Rt_S1					0,49***	0,39***	0,33***
Var_surf_S1						0,53***	0,20*

Tableau 4.8. Corrélation entre les différents flux de bois, et entre ces flux et les indices d'expansion des individus. IE: Intensité d'expansion. Significativité des tests : $P < 0.1$: (*), $P < 0.05$: *, $P < 0.01$: **, $P < 0.001$: ***. En gras : corrélations supérieures à 0,50 ou inférieures à -0,50

Par ailleurs, les corrélations entre ces flux relatifs et l'intensité d'expansion sont logiquement corrélés de façon plus intense qu'avec la part dans l'expansion.

Les corrélations entre les différents flux et l'IE et la part dans l'expansion montrent que les individus connaissant de fortes expansions de surface terrière sont ceux présentant les plus forts taux de croissance (corrélations de 0,56 ; **Tableau 4.8**). Ce sont aussi ces individus qui connaissent une forte intensité d'expansion (corrélations de 0,70). A contrario, les individus présentant de faibles intensités d'expansion sont ceux qui présentent les plus forts prélèvements (corrélations de -0,65). L'intensité d'expansion est aussi positivement corrélée aux variations de surface forestière relative de la même période (corrélations de 0,53). Les individus présentant les plus fortes variations de surface forestière relative sont ceux présentant une part croissante dans la surface terrière totale.

4.2 Explorations préliminaires, analyse des diagrammes des flux

L'ensemble des diagrammes des flux est présenté en **Annexe IV.6**.

Une analyse des diagrammes de flux permet de remarquer différents faciès de strates GRECO x type de propriété :

- Des strates globalement à l'équilibre, entre flux d'augmentation et de diminution de surface terrière, avec une absence de mortalité. C'est le cas, par exemple, des forêts communales de la GRECO Vosges (**Figure 4.16**).

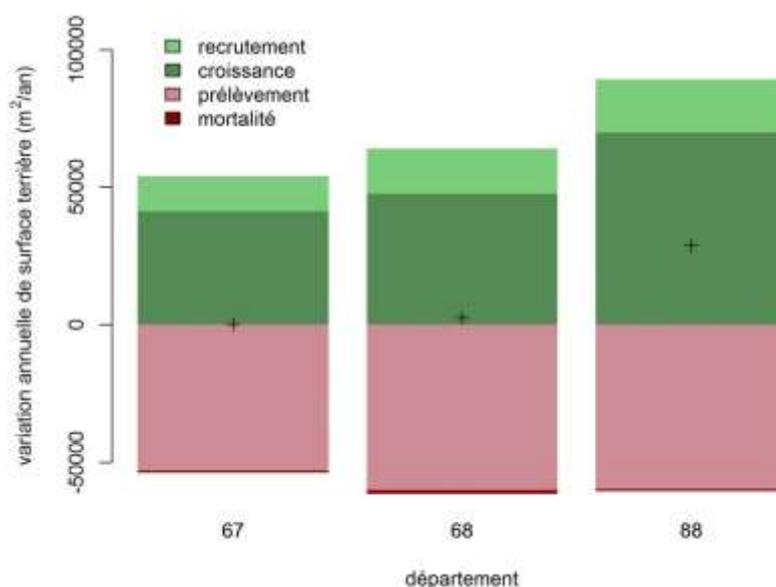


Figure 4.16. Diagramme des flux pour les forêts communales de la GRECO des Vosges. (+) représente la variation de surface terrière de la strate sur la période étudiée. Les départements sont renseignés par leur numéro administratif

- Des strates avec un accroissement net du stock de bois, un terme de recrutement élevé, et peu de prélèvements comme les forêts privées des Pyrénées ou du Massif Central (**Figure 4.17**), avec un terme de mortalité qui devient cette fois nettement identifiable.

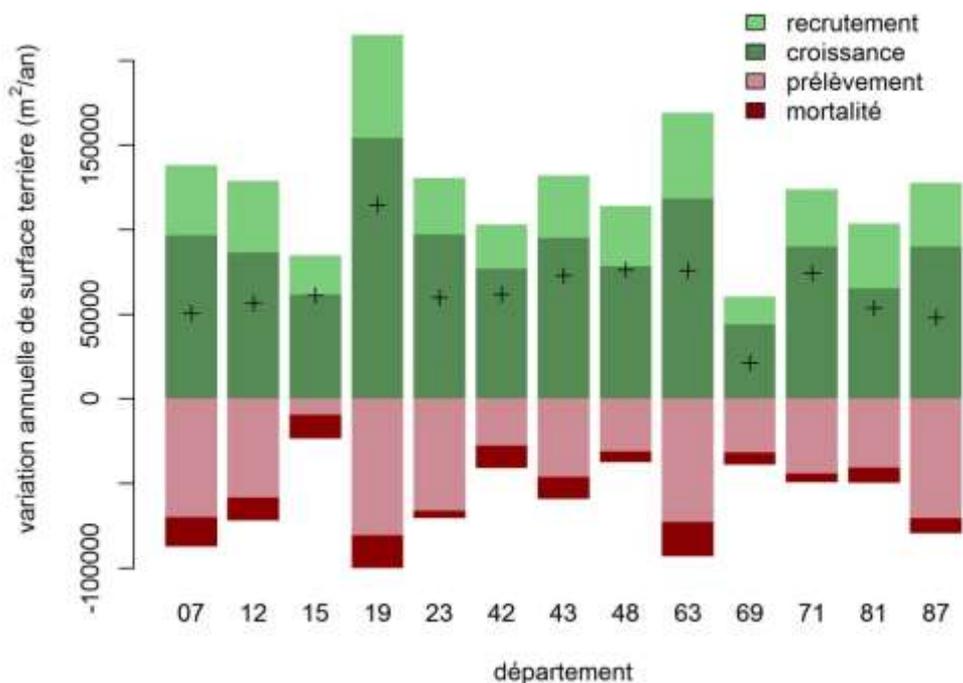


Figure 4.17. Diagramme des flux de bois pour les forêts privées de la GRECO du Massif Central. (+) représente la variation de surface terrière sur la période étudiée. Les départements sont renseignés par leur numéro administratif.

- Des forêts en limite de décapitalisation. C'est le cas, par exemple, des forêts domaniales du Haut-Rhin (département 68, **Figure 4.18**). **En règle générale, les forêts domaniales sont celles qui révèlent le plus de décapitalisation** (exemple dans les forêts du Grand-Est ; **Figure 4.19**).

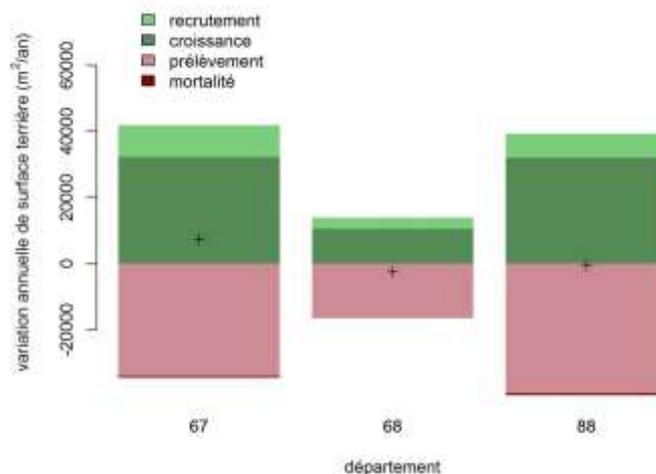


Figure 4.18. Diagramme des flux de bois pour les forêts domaniales de la GRECO des Vosges. (+) représente la variation de surface terrière sur la période étudiée. Les départements sont renseignés par leur numéro administratif.

4 - Résultats

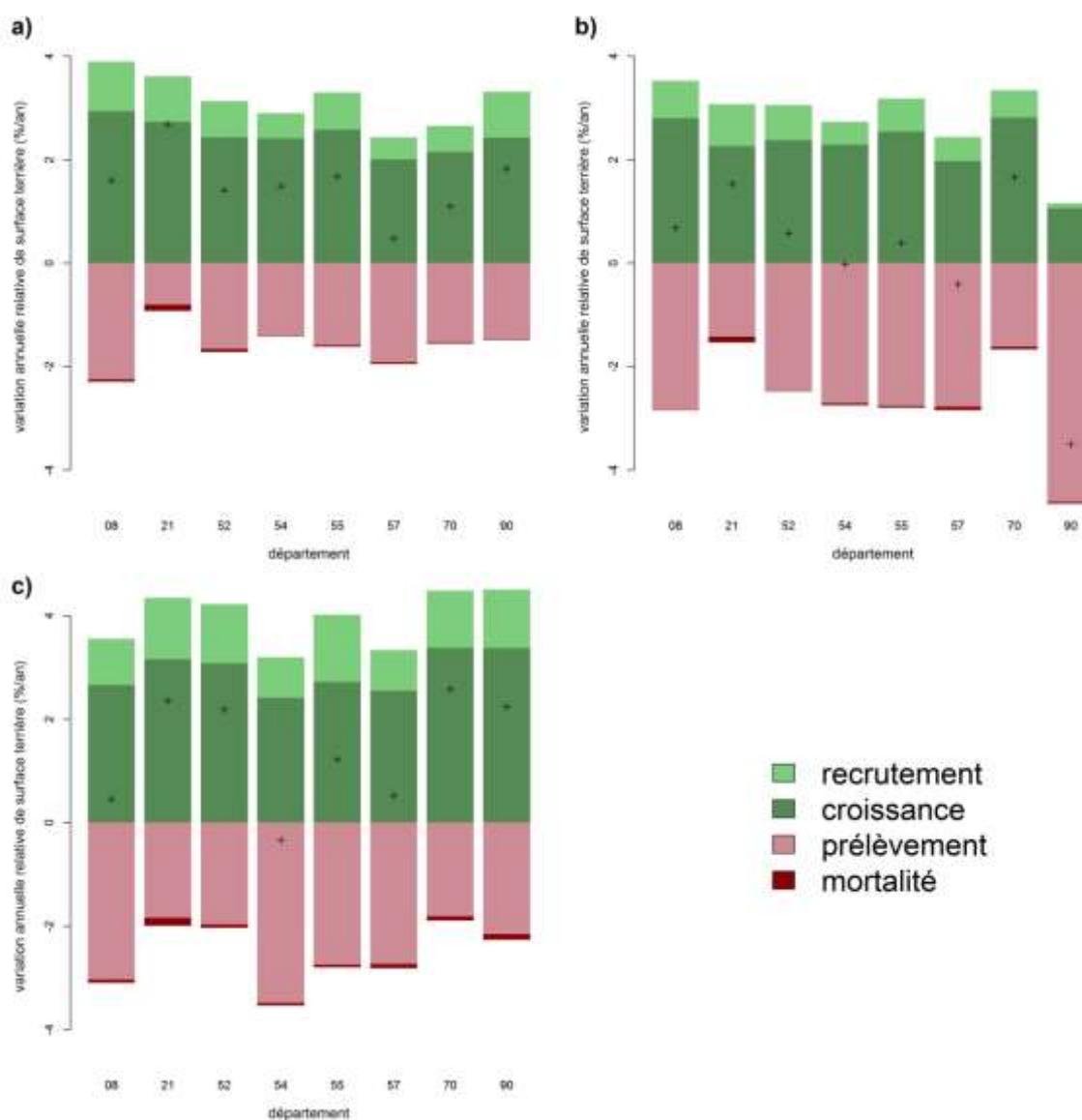


Figure 4.19. Flux annuels relatifs par rapport à la surface terrière initiale pour la GRECO Grand-Est et pour chaque type de propriété : communal (a), domanial (b) et privé (c). (+) représente la variation de surface terrière sur la période étudiée. Les départements sont renseignés par leur numéro administratif.

Parmi les différentes zones géographiques, les GRECO des Alpes, des Pyrénées et de la Corse présentent les plus fortes mortalités (**Annexe IV.6**).

4.3 Analyse de la dynamique du stock de bois pour les strates définies par les GRECO et la propriété

4.3.1 Répartition de l’expansion du stock de bois, analyse de l’intensité d’expansion

Les parts relatives de la surface terrière initiale et de l’expansion représentée par les différentes strates GRECO x type de propriété sont présentées au **Tableau 4.9**. Les forêts privées comptabilisent les trois-quarts de la surface terrière initiale. Les forêts privées du Massif Central représentent à elles seules quasiment un quart de l’expansion totale. Les seules forêts privées du Centre Nord semi-océanique (CN), du Sud-Ouest océanique (SO) et du Massif Central (MC) comptabilisent près de 50% de la surface terrière initiale et de l’expansion totale.

GRECO	Part dans la surface terrière initiale totale (%)				Part dans l’expansion totale en surface terrière (%)			
	Domanial	Communal	Privé	Total	Domanial	Communal	Privé	Total
GO	NR	NR	3,0	3,0	NR	NR	4,2	4,2
CN	2,9	0,7	17,1	20,7	1,0	1,1	14,0	16,1
GE	2,5	4,8	5,1	12,4	0,4	4,5	4,9	9,8
Vo	1,5	3,1	1,8	6,4	0,1	0,9	1,5	2,5
Ju	0,2	2,4	2,8	5,4	0,0	1,9	2,9	4,8
SO	NR	0,2	14,5	14,7	NR	0,2	15,3	15,5
MC	0,2	0,6	16,2	17,0	0,2	0,7	23,2	24,1
Al	1,1	3,3	7,0	11,4	1,2	2,6	8,1	11,9
Py	0,5	1,7	3,3	5,5	0,1	2,0	4,6	6,7
Me	0,4	NR	3,2	3,6	0,3	NR	4,0	4,3
Total	9,3	16,8	74	100	3,3	13,9	82,7	100

Tableau 4.9. Tableau 5. Part des strates GRECO x type de propriété dans le stock de bois total décrit par les inventaires initiaux de la période d’étude (1983 – 1995). Le stock est exprimé en surface terrière. Les strates non renseignées (NR) ont été écartées de l’analyse du fait de leur petite taille, voir section 3.4 et Annexe IV.7.

L’intensité d’expansion (IE), décrite comme le rapport entre la part dans l’expansion totale et la part dans la surface terrière initiale a été calculée. Elle représente le changement d’importance de la strate par rapport au total. On peut remarquer que les forêts privées présentent, en général, les plus fortes IE, au-dessus de l’unité (**Figure 4.20**), alors que les forêts domaniales présentent les plus faibles IE. Parmi les strates privées présentant la plus forte expansion, on retrouve les GRECO du Massif Central, du Sud-Ouest et du Centre Nord, ces deux dernières présentant toutefois un indice d’expansion plus proche de l’unité. Les forêts domaniales des Vosges, du Grand-Est et du Jura, des Pyrénées et du Centre-Nord connaissent les plus faibles IE, traduisant une intensité de gestion plus marquée dans les forêts domaniales soumises à l’aménagement, et gérées par un organisme dédié.

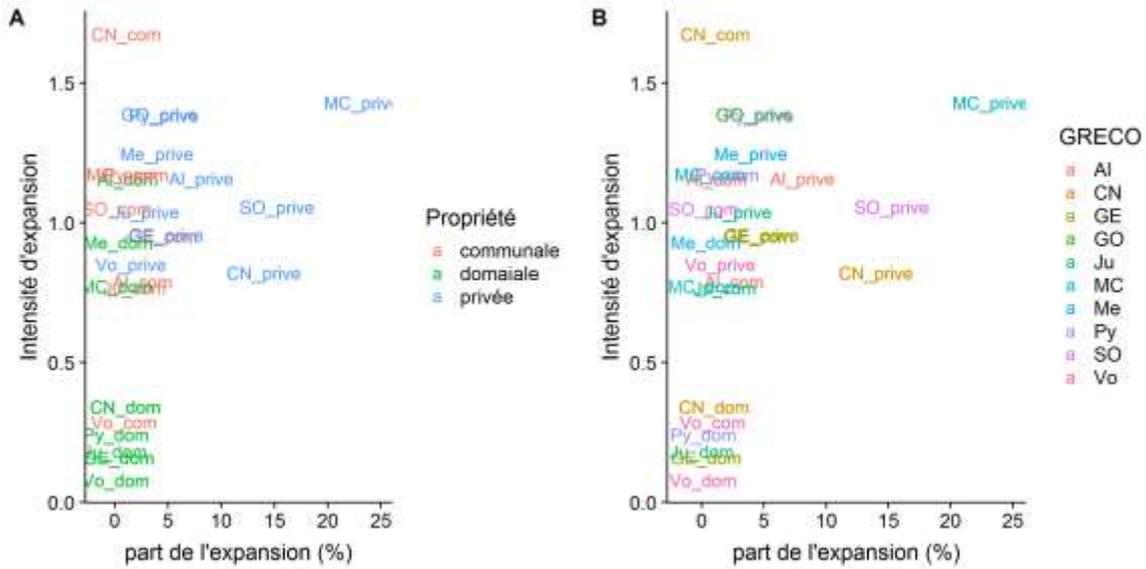


Figure 4.20. Intensité d'expansion en fonction de la part dans l'expansion totale des couples GRECO x propriété. Les couleurs permettent de distinguer les propriétés (à gauche) et les GRECO (à droite)

4.3.2 Structuration des states selon les flux de bois, analyse en composantes principales

4.3.2.1 Analyse de l'inertie

Le diagramme d'inertie du tableau individus x variables est présenté à la **Figure 4.21**. Il montre que les 3 premières composantes principales de l'ACP représentent à elles seules 89% de l'inertie totale (somme des variances des variables étudiées) de ce tableau (près de 50% pour la première composante). Nous sommes donc a priori amenés à conduire la typologie dynamique des strates étudiées sur la base de ces 3 composantes principales.

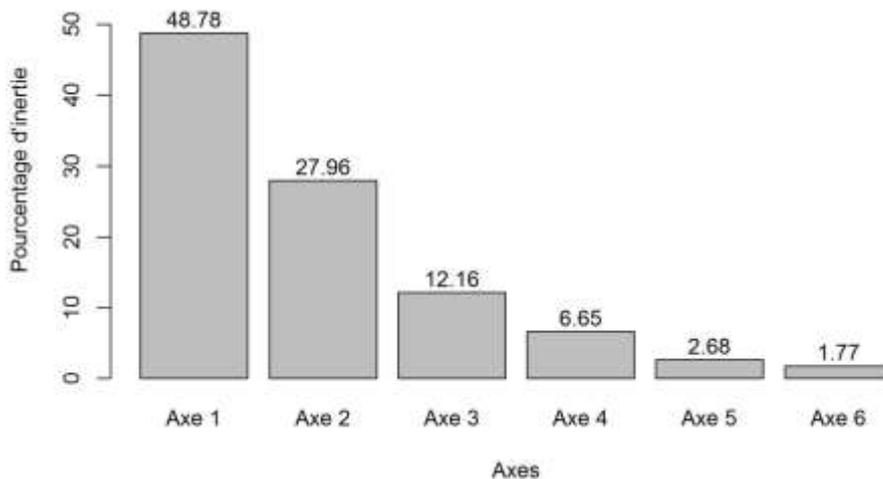


Figure 4.21. Diagramme d'inertie de l'ACP selon ses 6 composantes principales (en % de l'inertie totale).

4.3.2.2 Interprétation des axes principaux

Les cercles des corrélations relatifs aux deux premiers plans de l'ACP sont présentés en **figure 4.22**. Afin de faciliter l'interprétation, les corrélations entre les variables initiales et ces composantes sont par ailleurs présentées au **Tableau 4.10**.

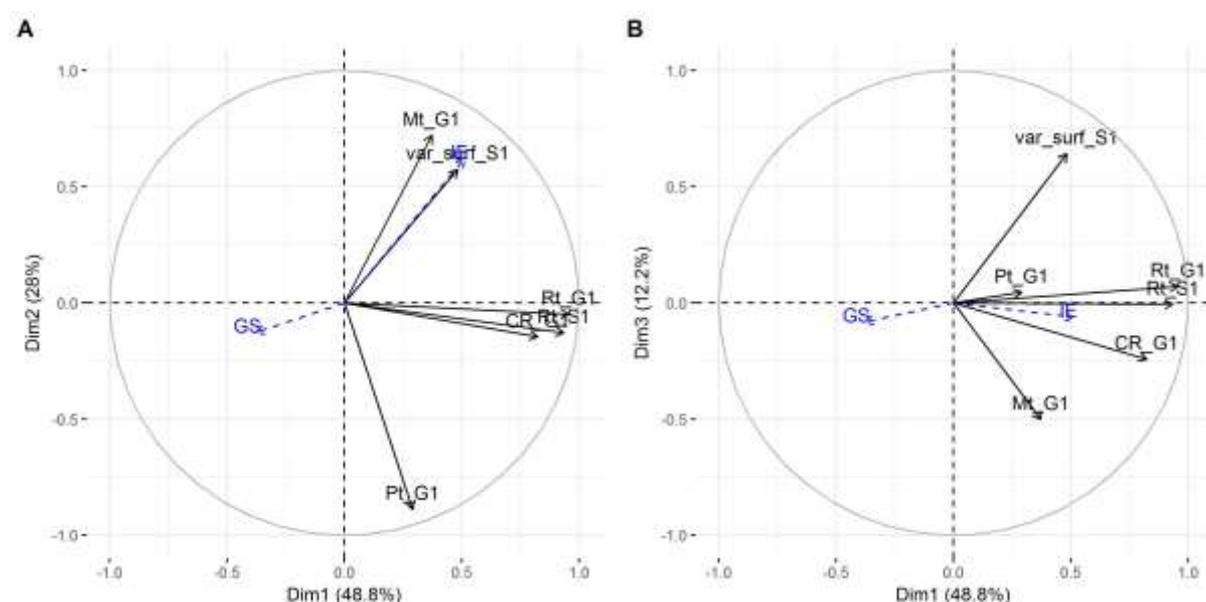


Figure 4.22. Cercles de corrélation de l'ACP selon les axes 1 et 2 (A) et 1 et 3 (B). Les variables supplémentaires quantitatives sont représentées en bleu. G2_G1_rel : variation de surface terrière de la strate entre t1 et t2 rapporté à la surface terrière initiale de la strate. IE : intensité d'expansion. GS : stock à l'hectare

	Corrélation		
	Axe 1	Axe 2	Axe 3
Mt_G1	0,37	0,72	-0,50
CR_G1	0,82	-0,15	-0,24
Pt_G1	0,29	-0,89	0,05
Rt_G1	0,96	-0,05	0,07
Rt_S1	0,94	-0,13	-0,01
Var_surf_S1	0,48	0,57	0,64

Tableau 4.10. Corrélation entre les variables statistiques étudiées (flux de bois relatifs et de surface) et les composantes principales de l'ACP. En gras : corrélations de plus de 0,50 ou de moins de -0,50

Axe 1. Un gradient de croissance biologique des forêts

L'axe 1 se corrèle à la croissance et au recrutement (corrélations de 0.82 pour CR_G1, 0.96 pour Rt_G1 et 0.94 pour Rt_S1 ; **Figure 4.22** et **Tableau 4.10**). Il existe une corrélation positive entre ces trois flux, les strates à forts recrutements étant aussi des strates où les arbres connaissent une forte croissance. **L'axe 1 est donc l'axe qui représente un gradient dynamique de croissance des forêts.**

Axe 2. Un gradient d'intensité de gestion

Le deuxième axe est corrélé positivement à la mortalité et aux variations de surfaces forestières (corrélations de 0.72 pour Mt_G1 et 0.57 pour var_surf_S1 ; **Tableau 4.10**) et négativement aux prélèvements (corrélations de -0,89). Cela signifie qu'il oppose des situations de forts prélèvements, où la mortalité est logiquement absente, et qui correspondent aussi à des forêts stationnaires au plan de leurs surfaces, de façon plausible de contextes forestiers déjà anciens et gérés, à des situations où les prélèvements sont faibles, et où la mortalité se manifeste, et qui se trouvent correspondre à des strates où la forêt est en extension (à la fois faible gestion et déprise sur les territoires concernés), auquel cas cette mortalité correspond à la mortalité juvénile liée à l'installation des peuplements. L'axe 2 peut donc être interprété **comme un gradient d'intensité de gestion forestière.**

Axe 3. Un gradient de maturité forestière pour des forêts en évolution naturelle ?

Enfin, l'axe 3 se corrèle à nouveau à la mortalité et aux variations de surface forestière, mais cette fois de façon opposée relativement à l'axe 2 (corrélations de -0,50 pour la mortalité et 0.64 pour les variations de surface). Cet axe permet de différencier les individus connaissant des augmentations de surface forestière (avec des faibles mortalités) de ceux connaissant de fortes mortalités (avec de faibles variations de surface forestière), et semblerait donc pouvoir correspondre, au sein de forêts peu prélevées (puisque ces variables s'opposent aux prélèvements) à un **gradient de maturité forestière**, allant de jeunes forêts résultant d'extension surfacique, à des forêts où la mortalité se manifeste en l'absence de prélèvements.

4.3.2.3 Apport des variables supplémentaires

Sur l'axe 1, le stock à l'hectare (GS) s'oppose à la croissance et au recrutement ce qui est logique et correspond **au phénomène de densité-dépendance**. On remarque aussi que GS s'oppose aux augmentations de surface. Les nouvelles forêts présentent peu d'arbres et donc une surface terrière à l'hectare faible. L'IE se corrèle à la fois aux axes 1 et 2, indiquant que soit la croissance, soit le renouvellement des forêts, sont associées à une forte augmentation de stock.

La visualisation des individus selon les axes 1, 2 et 3 en fonction de leur classe de densité montre que les individus ayant une densité très faible (entre 0 et 15 m²/ha) sont ceux qui présentent les plus fortes augmentations de surface forestière (**Figure 4.23**). **Cela est logique**

pour des nouvelles forêts présentant des arbres jeunes et une surface terrière faible. Ensuite, on remarque que les trois autres classes se différencient selon l'axe 1. Les forêts les plus denses présentent des croissances et des recrutements plus faibles, **ce qui correspond au phénomène classique de densité-dépendance des processus de croissance.** Cela peut également traduire une dimension de maturation progressive des forêts.

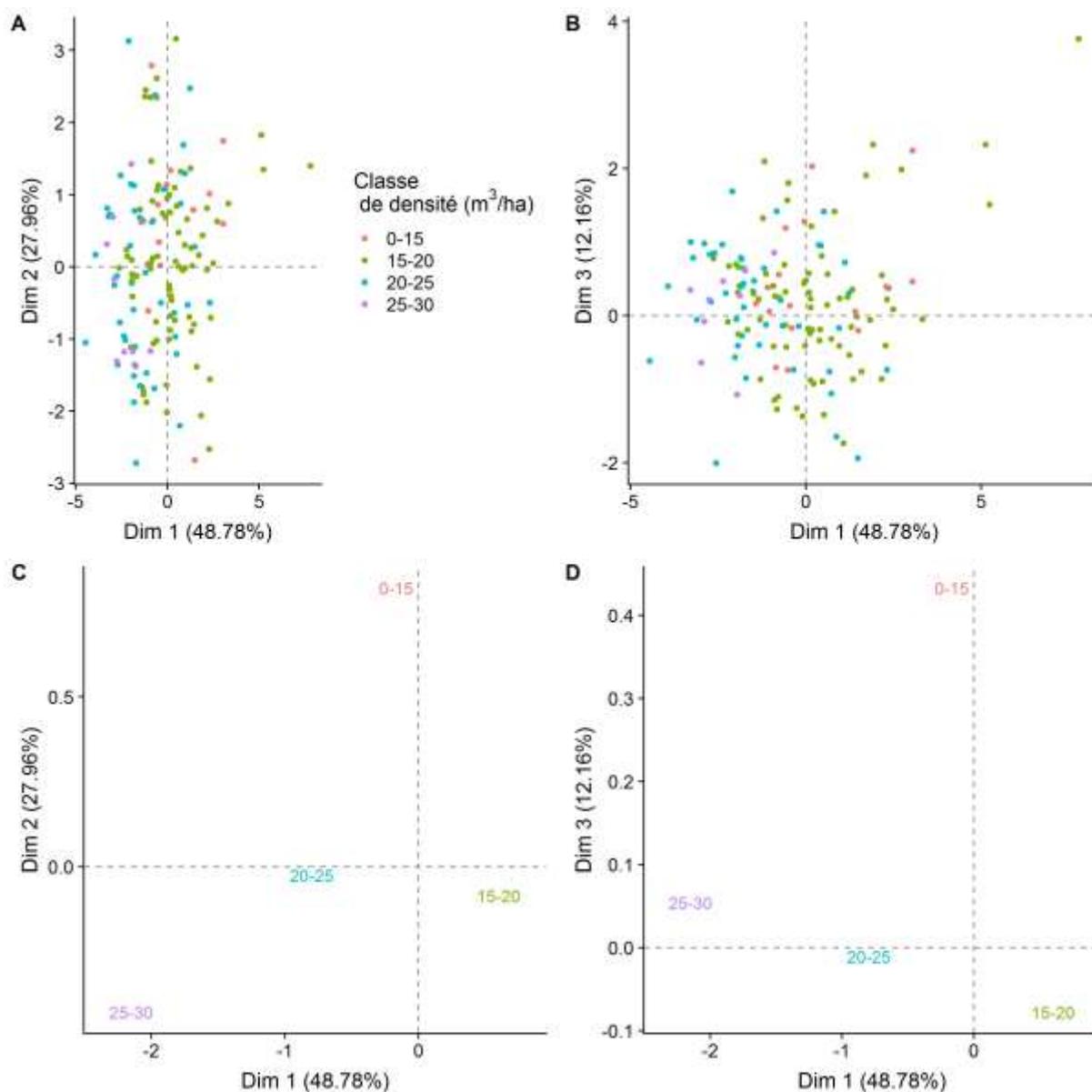


Figure 4.23. Position des individus selon les axes 1, 2 et 3 en fonction de leur densité et position du centres de gravité des classes de densité

La position des centres de gravité des différentes classes d'IE a également été étudiée (**Figure 4.24**). Les fortes IE sont associées au recrutement et à la croissance ainsi qu'aux taux d'augmentations de la surface forestière. Les faibles IE sont plutôt liées à de forts

prélèvements associés à une faible croissance et une faible mortalité, appuyant la corrélation déjà présentée entre IE et croissance et prélèvement (**Tableau 4.8**).

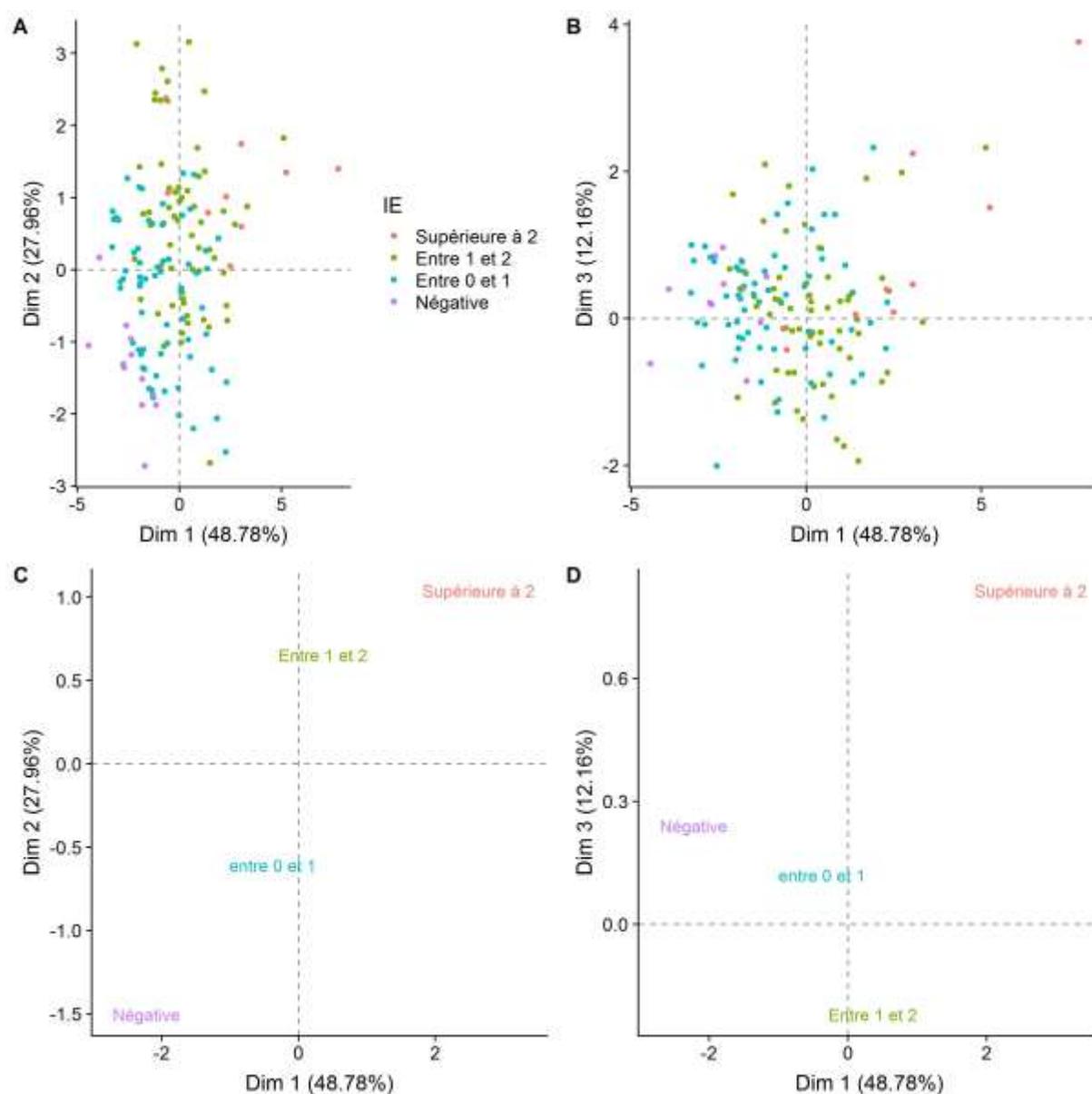


Figure 4.24. Position des individus selon les axes 1, 2 et 3 en fonction de leur intensité d'expansion (IE) et position du centres de gravité des classes d'intensité d'expansion

Les classes d'IE et de propriété forestière ont été analysées conjointement, et le même schéma d'organisation (fortes IE associées au recrutement et à la croissance ainsi qu'aux taux d'augmentations de la surface forestière et faibles IE plutôt liées à de forts prélèvements associés à une faible croissance et une faible mortalité) se retrouve dans chaque type de

propriété (**Figure 4.25**) montrant que les causes d'intensité d'expansion sont globalement les mêmes au sein de chaque propriété.

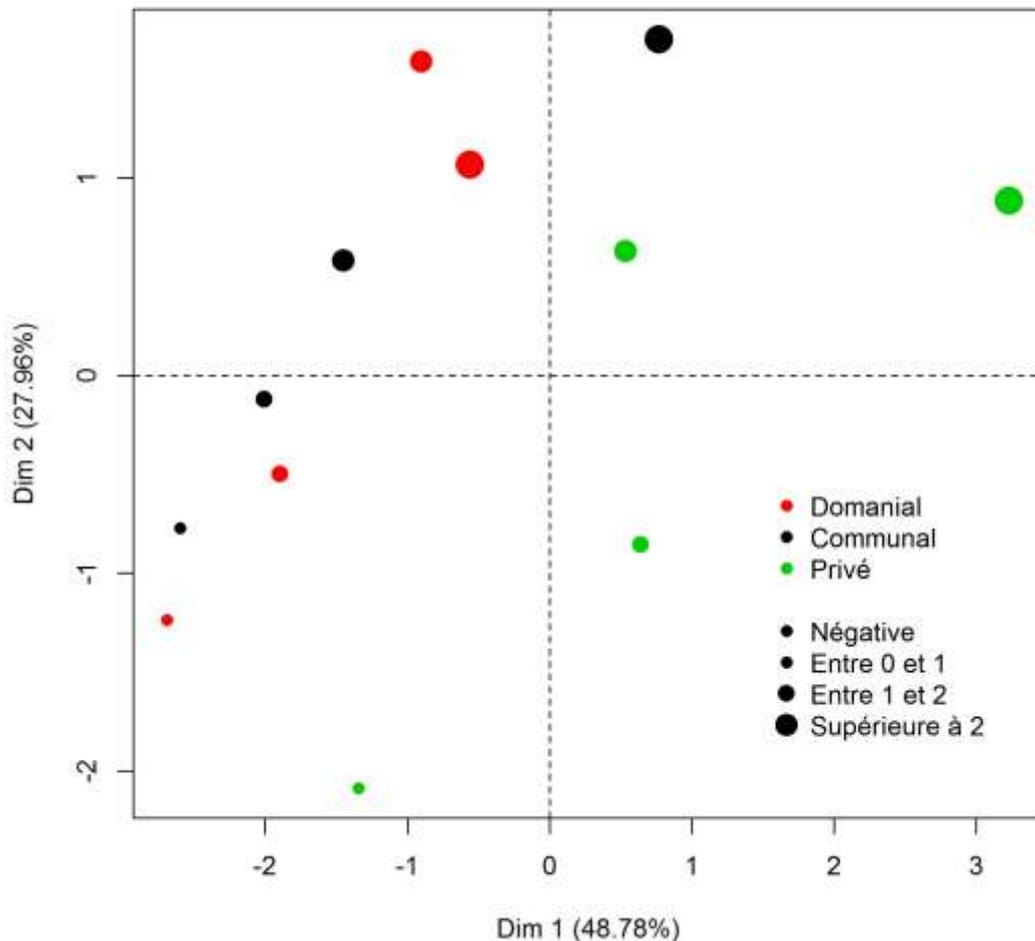


Figure 4.25. Position des centres de gravité des classes d'intensité d'expansion par type de propriété selon les trois premiers axes de l'ACP

4.3.2.4 Rôle de la stratification en propriété forestière et GRECO

Le nuage de point des individus par type de propriété montre des classes peu séparées (**Figure 4.26**). Cependant, on peut remarquer que les forêts privées présentent des coordonnées plus élevées sur l'axe 1 que les forêts publiques, ce qui correspond à de plus fortes croissances au sens large (croissance et recrutement), et que les forêts domaniales sont moins avancées que les forêts communales sur l'axe 2, c'est-à-dire davantage sujettes à prélèvements. En outre, sur l'axe 3, la forêt privée domine le pôle de mortalité mais aussi celui des nouvelles forêts, ce qui est logique, étant donné que l'expansion en surface des forêts française est dominée par ces forêts (cf. partie III).

Pour mieux différencier les types de propriété, la localisation des centres de gravité des trois propriétés forestières a été étudiée (**Figure 4.26**). Les forêts privées présentent des coordonnées positives selon les axes 1 et 2 et négatives selon l'axe 3, correspondant à des forêts à forte croissance et fortes mortalités. Les forêts publiques présentent de plus faibles croissances (coordonnées négatives selon l'axe 1) et les forêts domaniales de faibles mortalités. Les forêts domaniales connaissent les plus forts prélèvements que les forêts communales.

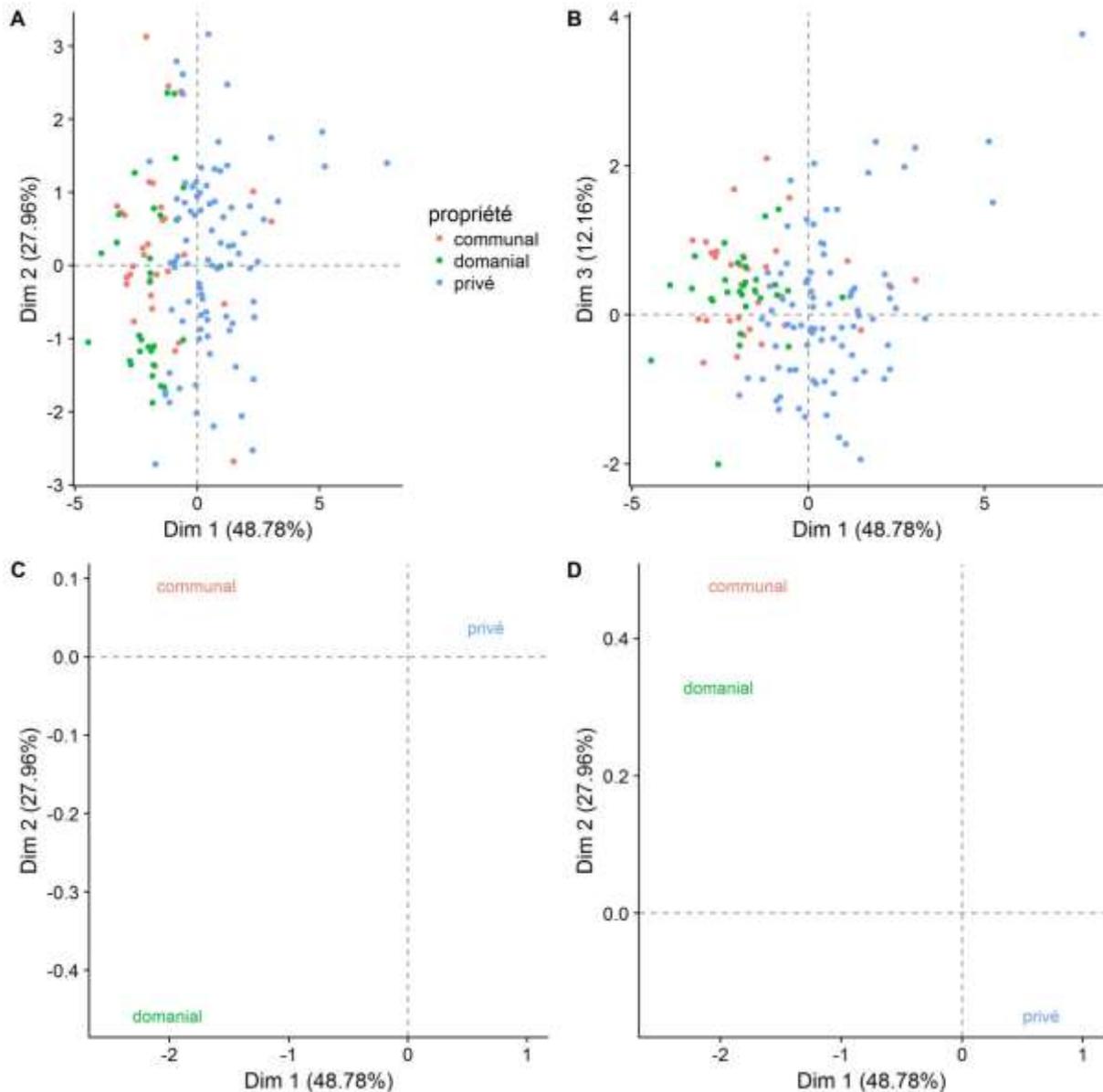


Figure 4.26. Représentation des individus dans les deux premiers plans principaux de l'ACP selon le type de propriété (A et B) et localisation des centres de gravité par type de propriété (C et D)

L'étude du centre de gravité des différentes GRECO montre que sur l'axe 1, on peut différencier deux groupes : d'un côté les GRECO de l'Ouest (SO, MC et GO), présentant une forte croissance et un fort recrutement et, à l'opposé, les GRECO du Nord et du Nord-Est et de haute montagne (CN, GE, Vo, Ju, Al et Py), présentant une faible croissance et un faible recrutement (**Tableau 4.11** ; **Figure 4.27**). Sur l'axe 2, on remarque les GRECO du Nord et du Nord-Est (CN, GE et Vo) qui connaissent une diminution de leurs surfaces et la GRECO SO connaissant de forts prélèvements contrairement aux GRECO de hautes montagne (Py et Al) qui connaissent les plus faibles prélèvements. Enfin, sur l'axe 3, on peut distinguer la GRECO GO qui présente des fortes variations de surface terrière relative et la GRECO MC qui présente une mortalité élevée.

	Axe 1	Axe 2	Axe 3
Grand-Est	-1,4	-0,8	0,03
Alpes	-1,3	1,02	0,2
Vosges	-1,08	-1,22	0,44
Jura	-0,9	0,01	-0,48
Pyrénées	-0,82	1,09	-0,03
Centre Nord	-0,18	-0,27	0,06
Méditerranée	0	0,33	0,74
Sud-Ouest	1,3	-0,78	-0,28
Massif Central	1,3	0,8	-0,56
Grand-Ouest	3,56	0,69	1,54

Tableau 4.11. Coordonnées des centres de gravité des GRECO sur les trois premiers axes de l'ACP

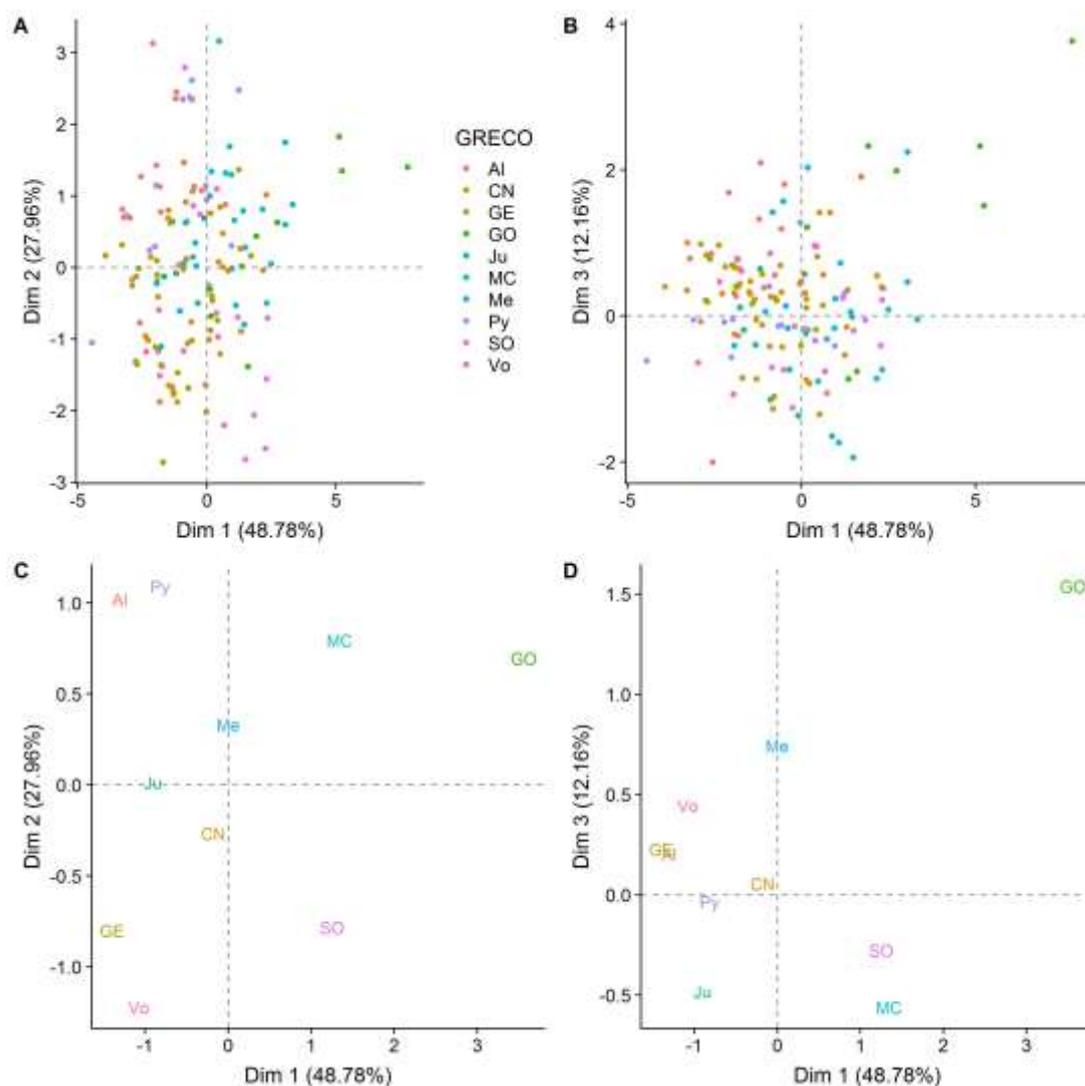


Figure 4.27. Position des centres de gravité des GRECO selon les trois premiers axes de l'ACP

Les variables de GRECO et de type de propriété ont été croisées. On peut remarquer que la GRECO Grand Est (GE ; **Figure 4.28**) ainsi que les Vosges (Vo) présentent de faibles variations relatives de surface forestière ainsi qu'une faible croissance, et cela spécialement dans les forêts domaniales. Les GRECO de haute montagne, Alpes (Al) et Pyrénées (Py), connaissent également une faible croissance mais contrairement aux GRECO du Nord-Est, elles connaissent de faibles prélèvements et principalement dans les forêts publiques. Les forêts les plus prélevées sont celles du SO et principalement du SO communal. Les forêts privées du GO connaissent à la fois les plus fortes croissances et les plus fortes variations de surface forestière relative. Les forêts du MC présentent également de fortes croissances mais les forêts privées y connaissent également de fortes mortalités.

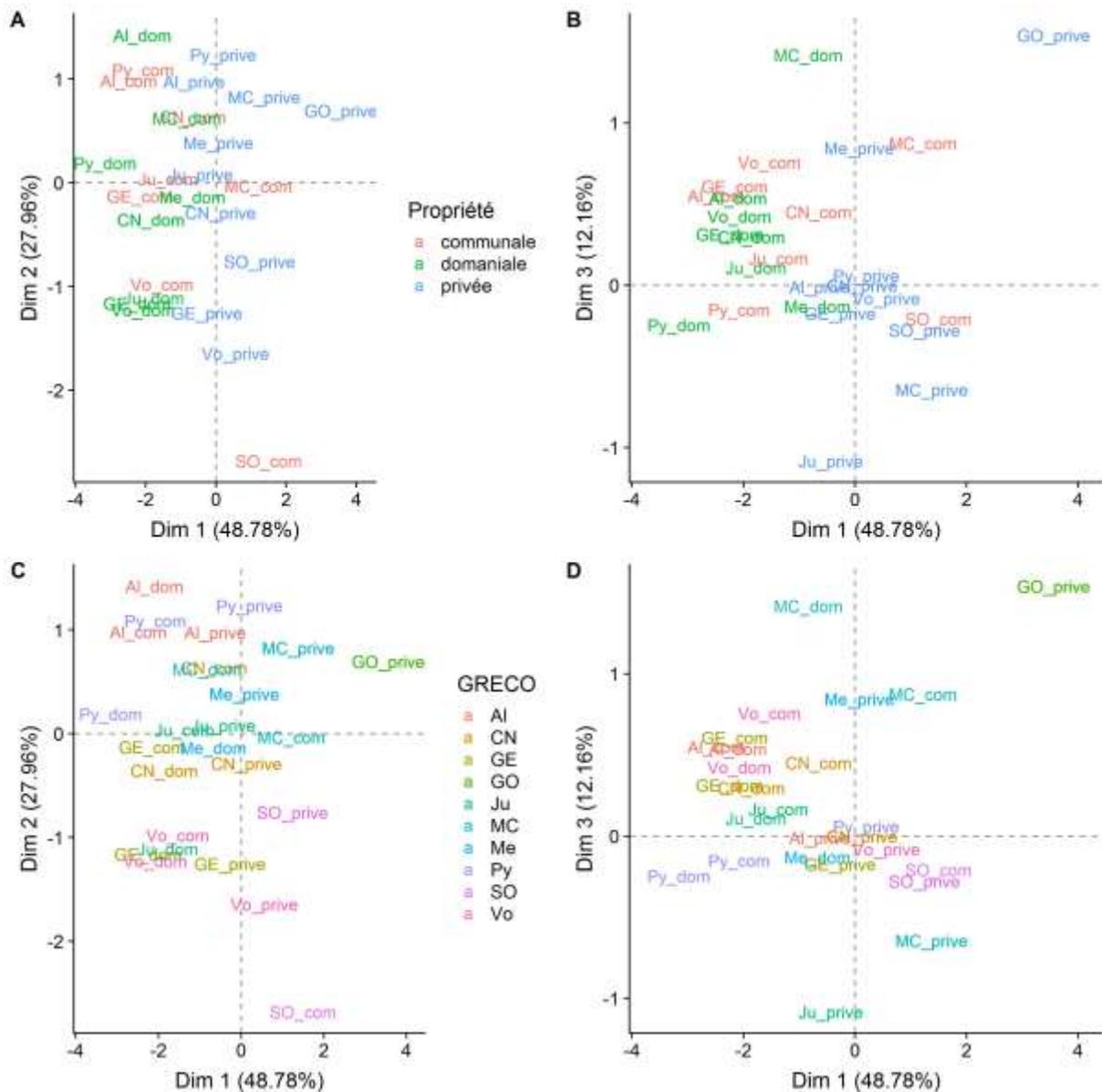


Figure 4.28. Position des centres de gravité des strates GRECO x type de propriété selon les trois premiers axes de l'ACP

4.3.3 Typologie des strates forestières fondée sur les flux de bois

Une classification ascendante hiérarchique a été effectuée sur les strates à partir de leurs coordonnées sur les trois premiers axes principaux significatifs (cf. 4.3.2.1 et 4.3.2.2). Elle révèle une organisation assez lisible. Cependant, elle a été réorganisée (individus isolés), et sept classes, appelées « faciès dynamiques » dans la suite, ont été raisonnées (Figure 4.29). Les faciès dynamiques ont été classés par IE décroissante.

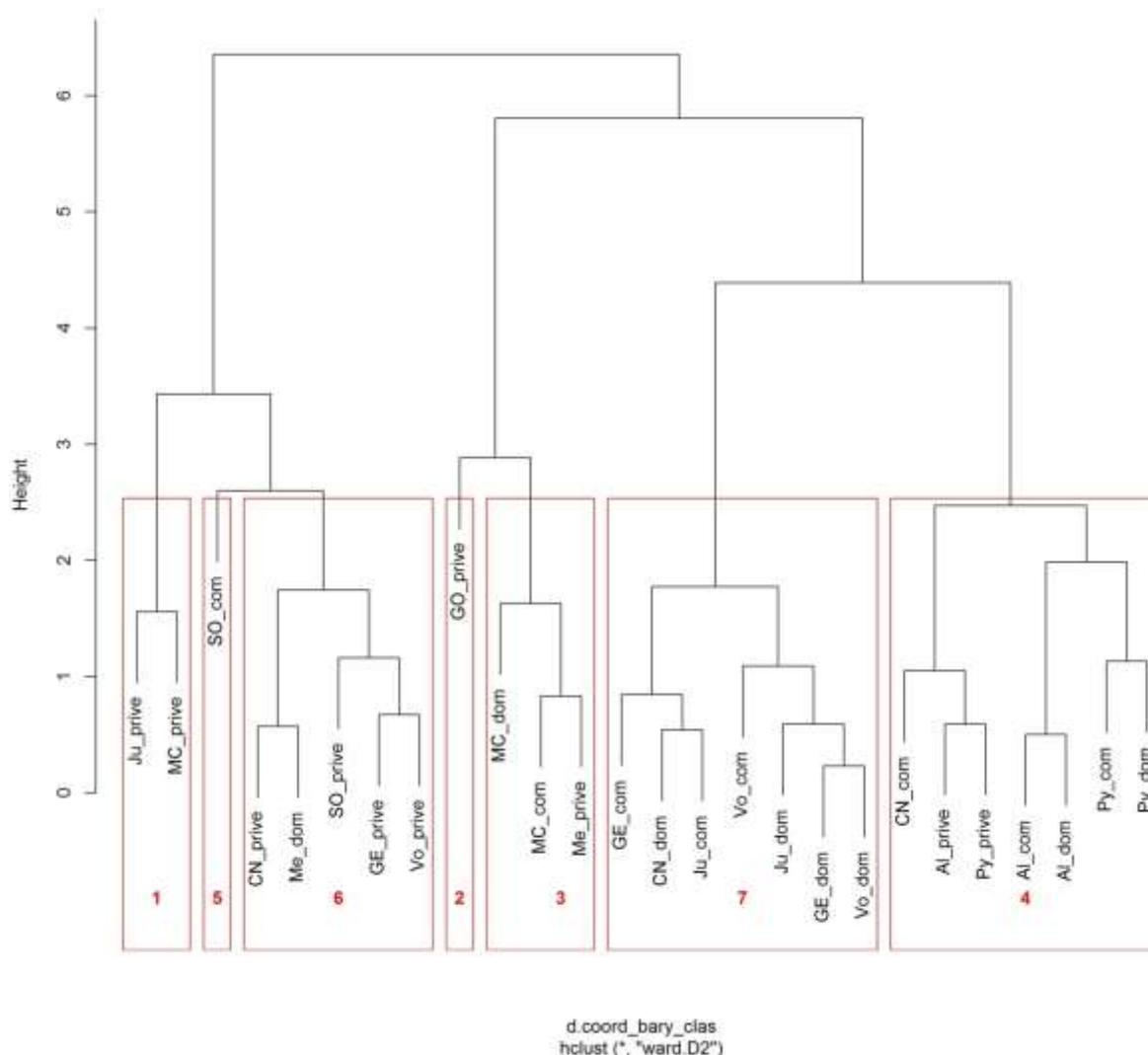


Figure 4.29. Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique appliquée aux centres de gravité des strates GRECO x type de propriété. Le dendrogramme a été construit à partir des 3 axes principaux de l'ACP. 7 facies dynamiques (cadres rouges) primaires ont été identifiées.

Les projections des strates dans les deux premiers plans principaux sont présentées en **Figure 4.30**. Les diagrammes de flux de bois associés à ces 7 facies sont présentés à la **Figure 4.31**. Les caractéristiques de ces facies dynamiques sont enfin présentées au **Tableau 4.12** où les niveaux relatifs des flux ont été codés de façon synthétique.

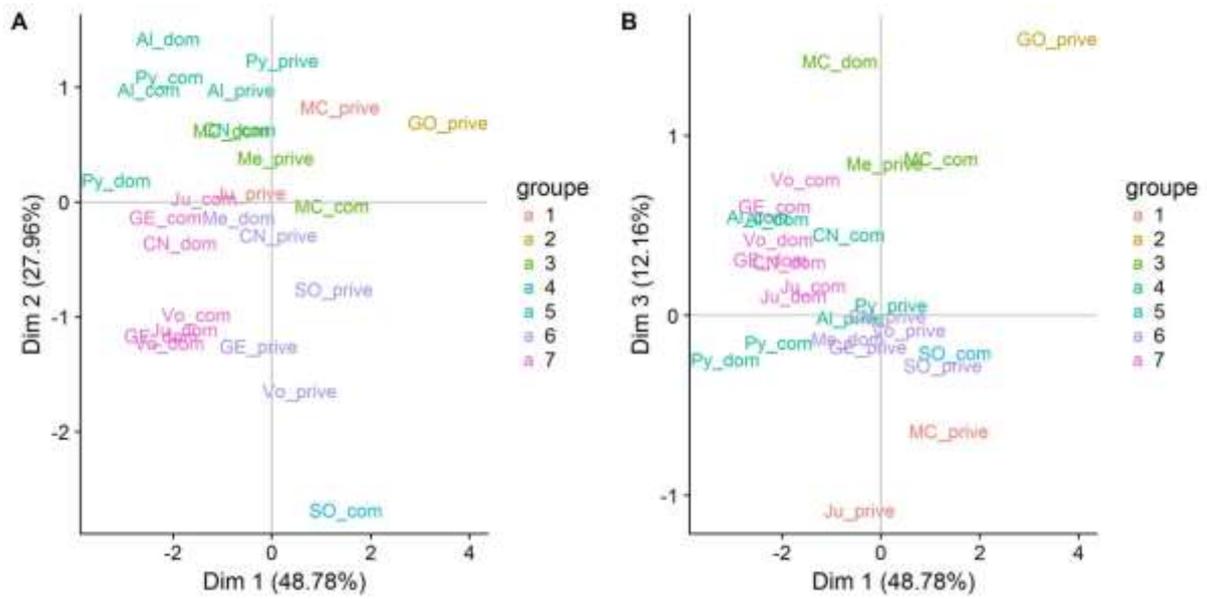


Figure 4.30. Représentation des facies formés par la classification selon les trois premiers axes de la classification

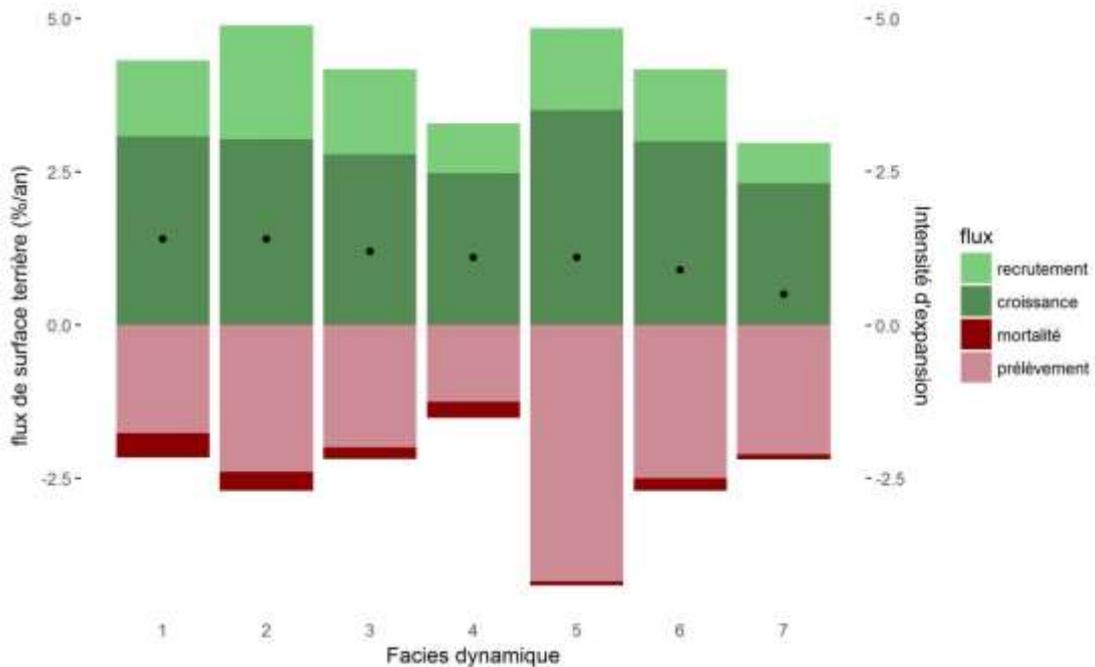


Figure 4.31. Histogramme des flux relatifs annuels pour chacun des facies dynamiques identifiés

Facies	Nom	Part du facies dans la surface terrière initiale (%)	Part du facies dans l'expansion totale (%)	IE du facies	Stock à l'hectare (m ² /ha)	Dynamique			
						CR et Rt	Variation de surface	Pt	Mt
1	Forêts privées de moyenne montagne	19,0	26,1	1,4	19,0	+	0	-	+
2	Forêts privées du Nord-Ouest	3,0	4,2	1,4	18,2	+	+	-	0
3	Principalement forêts privées méditerranéennes	4,0	4,9	1,2	12,4	0	+	-	0
4	Forêts des Alpes et des Pyrénées (haute montagne)	17,6	19,7	1,1	19,1	-	0	-	0
(5)	(Forêts communales du Sud-Ouest)	(0,2)	(0,2)	(1,1)	14,6	(+)	(-)	(+)	(-)
6	Forêts privées de tradition forestière de plaines du Nord-Est et du Sud-Ouest	38,9	36,0	0,9	17,8	0	-	+	-
7	Forêts publiques de plaine et moyenne montagne du Nord et Nord-Est de la France	17,4	8,8	0,5	21,2	-	-	+	-

Tableau 4.12. Tableau synoptique des facies dynamiques identifiés au grain GRECO x propriété forestière par classification ascendante hiérarchique. Dynamique : représente l'importance des flux dans la dynamique des facies. CR : croissance ; Rt : recrutement ; Pt : prélèvement ; Mt : mortalité ; + : flux fort ; 0 : flux moyen ; - : flux faible. Le facies 5 a été présenté en gris clair et entre parenthèse car sa contribution dans la surface terrière totale et l'expansion est anecdotique

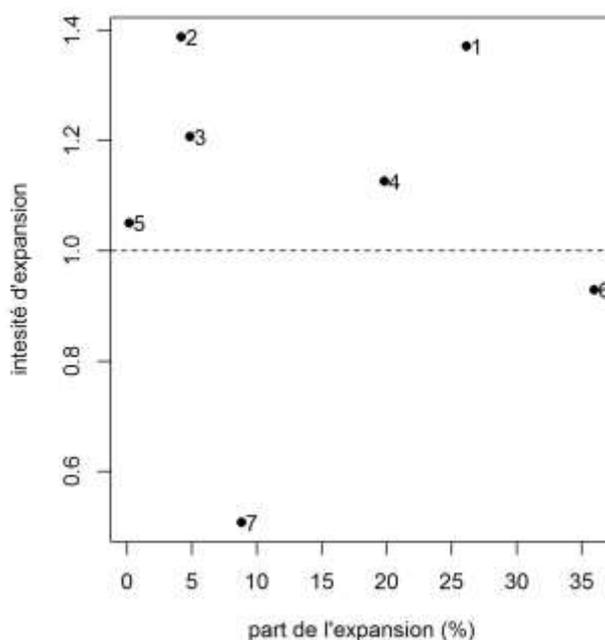


Figure 4.32. Part dans l'expansion totale des facies en fonction de leur intensité d'expansion

Facies dynamiques ayant un poids croissant dans la ressource forestière ($IE > 1$) :

- (i) **Facies 1** ($IE = 1,4$; 26,1% de l'expansion ; **Tableau 4.12 ; Figure 4.32**) : **il est composé principalement des forêts privées de moyenne montagne (Massif Central principalement, et Jura). Ces forêts connaissent de forts niveaux de croissance et de faibles prélèvements mais une mortalité marquée, la plus élevée des différents types (Tableau 4.12, Figures 4.30 et 4.31). En revanche, les termes de recrutement et d'augmentation des surfaces sont plus modestes, et traduisent une dynamique déjà avancée. On peut y reconnaître la signature des boisements déjà anciens du programme de boisement FFN,**
- (ii) **Facies 2** ($IE = 1,4$; 4,2% de l'expansion) : **il est composé des forêts privées du Grand-Ouest. Ces forêts connaissent de fortes croissances. Par différence avec le facies précédent, elles montrent cependant des niveaux de recrutement plus marqués, une densité de stock (stock à l'hectare) plus faible, ainsi que de fortes augmentations de surface forestière relative. Elles sont donc en plein essor, et on peut supposer un stade de développement moins avancé que pour le facies 1, correspondant à des forêts plus récentes. Une étude prenant en compte les essences forestières pourra confirmer l'hypothèse selon laquelle il s'agit là de plantations dans cette région.**
- (iii) **Facies 3** ($IE = 1,2$; 4,9% de l'expansion) : **Il est composé des forêts privées, essentiellement de Méditerranée. Leur profil dynamique est très semblable à**

celui du premier type (**Figure 4.31**). Comme pour le type précédent, elles connaissent de fortes augmentations de surface forestière relative, mais des **niveaux de croissance moindres**.

- (iv) **Facies 4** (IE = 1,1 ; 19,7% de l'expansion) : il est constitué des **forêts des grands massifs de montagne, Alpes et Pyrénées, toute catégorie de propriété confondue** (même si la forêt privée domine ces strates ; **Annexe IV.10**), **suggérant que le contexte biophysique prédomine sur la propriété dans leur dynamique de stock**. Ces forêts présentent un niveau moyen de croissance faible, logique en montagne, mais le niveau moyen de taux de prélèvement est aussi le plus faible de l'ensemble des groupes (**Figures 4.30 et 4.31**), et permet de comprendre leur contribution à l'expansion. Le recrutement reste modéré. Ce facies présente une densité plus forte que celle des trois facies précédents, signe d'une forêt déjà plus mature.

Facies ayant un poids décroissant dans la ressource forestière (IE < 1) :

- (i) **Facies 5** (IE = 1,1 ; 0,2% de l'expansion) **et Facies 6** (IE = 0,9 ; 36% de l'expansion) : le caractère négligeable du 5^e groupe dans le stock total, et sa forte proximité dynamique avec le groupe 6 (**Tableau 4.12**), amènent à les considérer conjointement. Ce groupe est dominé par les **forêts privées des plaines du Nord, de l'Est, et du Sud-Ouest, de tradition forestière ancienne**, complété par des forêts publiques du Sud. **Le niveau des prélèvements (Figures 4.30 et 4.31) y est le plus marqué des différents groupes, avec un taux de mortalité parmi les plus faibles, et traduit la vocation forestière de ces forêts. Leur caractère ancien est confirmé par une absence de progression des surfaces (Figure 4.30)**. Les prélèvements restent néanmoins inférieurs à l'accroissement, expliquant son expansion.
- (ii) **Facies 7** (IE = 0,5 ; 8,8% de l'expansion) : **il correspond aux forêts exclusivement publiques du Nord et Nord-Est de la France, incluant les massifs de moyenne montagne des Vosges et du Jura**, avec par conséquent des similitudes géographiques avec le groupe 6. Ces forêts présentent le niveau relatif de **prélèvement le plus élevé à ce niveau de croissance**. Le recrutement y est faible. La mortalité y est absente. **Le niveau des prélèvements, plus modeste que dans les autres groupes, trouve son explication dans le niveau de densité élevé, traduisant probablement le phénomène de densité-dépendance de la croissance (Tableau 4.12)**

A titre comparatif, on peut remarquer la forte ressemblance des facies 4 et 7 quant à leur surface terrière initiale (entre 40,0 et 39,5 millions de m² respectivement ce qui représente 17,4 et 17,6% ; **tableau 4.12**). Cependant, le facies 7, composé de forêts publiques du Nord et

du Nord-Est, ne représente que 8,8% de l'expansion forestière alors que le facies 4, composé principalement des forêts des Pyrénées et des Alpes, connaît une expansion beaucoup plus forte, représentant 19,8% de l'expansion totale. Ces deux facies se distinguent principalement par leur niveau de prélèvements.

4.3.4 Synthèse

Au niveau de résolution défini par les GRECO et la propriété forestière, **l'ensemble des strates forestières contribue à l'expansion du stock de bois** (expansion décrite, correspondant à 95% de l'expansion totale ; voir 3.4), sous-tendu par le constat de **niveaux de prélèvement toujours en deçà des niveaux de croissance/recrutement**, y compris dans les strates de forêts publiques les plus gérées. Au plan de la gestion forestière, cela souligne l'intérêt de politiques forestières visant à mobiliser davantage de bois.

Deux ensembles significatifs contribuent à l'expansion, avec une intensité d'expansion très marquée. Il s'agit (a) **des forêts exclusivement privées des moyennes montagnes du Massif Central et du Jura** (complétées par les forêts privées du Grand Ouest plus jeunes, et celles de Méditerranée), (b) **des forêts de haute montagne des Alpes et des Pyrénées, toute catégorie de propriété confondue**, avec un niveau de croissance plus faible. Les taux de recrutement y restent modérés, traduisant le caractère déjà assis de ces forêts. **Deux facteurs sont ainsi mis en évidence pour leur rôle dans l'expansion : la formation de nouvelles ressources en forêt privée (plaine et moyenne montagne), et le handicap naturel à la mobilisation de bois formé par la haute montagne.**

Ces ensembles sont complétés par la **forêt privée de plaines** (Nord, Nord-Est et Sud-Ouest), déjà ancienne et avec des termes de progression dynamique (surface, recrutement) faibles. **Tandis que ce groupe montre les prélèvements les plus élevés, et perd de l'importance dans la ressource, son importance absolue l'amène à contribuer autant à l'expansion absolue que les deux premiers ensembles. Il s'agit pourtant de forêts gérées.**

En résumé

L'expansion du stock décrite (*i.e.* 95% de l'expansion totale) de bois est sous-tendue par trois compartiments dominants:

- (i) des ressources nouvelles ou récentes en forêt privée de plaine à moyenne montagne, en plein essor (25%),
- (ii) des ressources de haute montagne de toute propriété dont l'exploitation est contrainte par le relief (25%)
- (iii) des ressources déjà assises en forêt privée, ou le prélèvement est significatif malgré son niveau inférieur aux accroissements (50%). Les leviers d'une mobilisation supplémentaire de bois (par comparaison au groupe des forêts publiques) ne paraissent aisés à court terme que dans le dernier compartiment. L'enjeu de mobilisation est une question de coût pour le second, de temps et de volonté de gestion pour le premier.

Ces constats soulèvent plusieurs questions : la mortalité observée dans les forêts privées du Massif Central (facies 1) est-elle représentative d'un phénomène de mortalité généralisé de cette strate ou est-ce l'empreinte de phénomènes plus localisés ? Les forêts de haute montagne (facies 4) présentant une croissance et des prélèvements faibles sont-elles de jeunes forêts qui présentent des difficultés à s'établir (à cause, par exemple, du climat difficile de la région) ou des forêts matures non exploitées ? Ces questions nous poussent à préciser notre étude à la fois par essence et par classe de diamètre.

4.4 Analyse de la dynamique des stocks de bois pour les strates définies par les facteurs GRECO x type de propriété x essence

L'ACP normée des individus DPE a été réalisée, avec deux variables qui n'existent toutefois plus : les flux de surface forestière, et le recrutement relatif à la surface forestière. De même, l'expansion a été utilisée en variable supplémentaire, mais le stock à l'hectare n'a plus de signification puisqu'il se rapporte à une surface de référence.

Ses axes diffèrent peu de ceux de l'ACP de premier niveau. Trois axes permettent de représenter 94% de l'inertie totale (**Figure 4.33**).

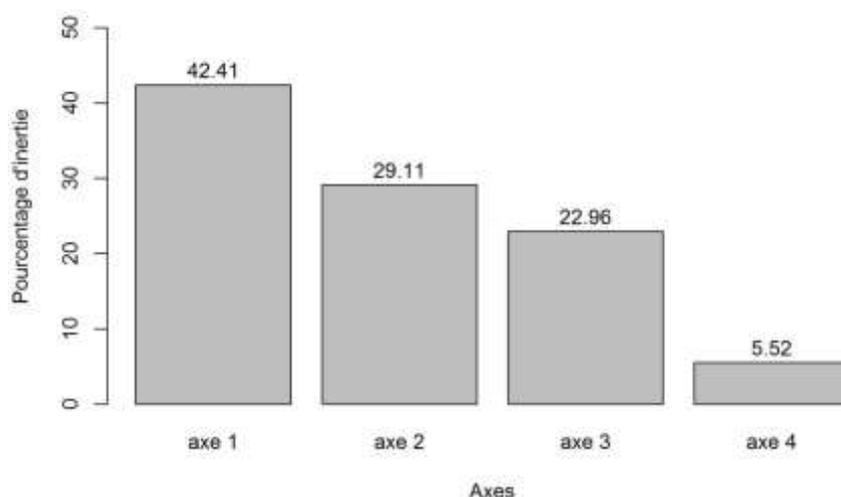


Figure 4.33. Diagramme d'inertie de l'ACP normée sur les flux de bois relatifs des individus DPE. Les chiffres indiqués correspondent à la part de l'inertie portée par chaque axe

4.4.1 Interprétation des axes

L'axe 1 se corrèle à la croissance et au recrutement (corrélations de 0,87 pour CR_G1 et 0,93 pour Rt_G1; **Tableau 4.13** ; **Figure 4.34**). L'axe 1 représente à nouveau le **gradient de dynamique de croissance biologique**.

L'axe 2 se corrèle positivement aux prélèvements (corrélation de 0,87) et négativement à la mortalité (corrélation de -0,60; **Tableau 4.13**). L'axe 2 peut donc être interprété à nouveau comme un **gradient d'intensité de gestion**.

Enfin, l'axe 3 se corrèle à nouveau à la mortalité (corrélation de 0,75), selon une dimension indépendante de la précédente. **Bien qu'on puisse parler de gradient de mortalité, son interprétation sera à éclaircir dans la mesure où il ne s'agit vraisemblablement pas de mortalité densité-dépendante.**

Afin de regrouper des strates forestières présentant une dynamique similaire et les relier aux indicateurs d'expansion du stock de bois, une nouvelle classification ascendante hiérarchique a été opérée sur les coordonnées des centres de gravité de ces strates sur les trois premiers axes de l'ACP. **Le choix a donc été raisonné de concevoir une nouvelle classification à ce niveau d'analyse, plutôt que d'augmenter simplement le niveau de résolution de la première classification. Il tient à une attitude de prudence, consistant à faire l'hypothèse que des strates très homogènes au niveau GRECO x propriété pourraient masquer des hétérogénéités marquées avec le niveau supplémentaire de l'essence, conduisant à l'éventualité que les sous-strates appartiennent en réalité à des faciès dynamiques différents.**

	Axe 1	Axe 2	Axe 3
Mt_G1	0,27	-0,60	0,75
CR_G1	0,87	-0,11	-0,39
Pt_G1	0,11	0,87	0,44
Rt_G1	0,93	0,18	0,09

Tableau 4.13. Corrélations des variables sur les trois premiers axes principaux. En gras : les corrélations supérieures à 0,50 ou inférieures à -0,50

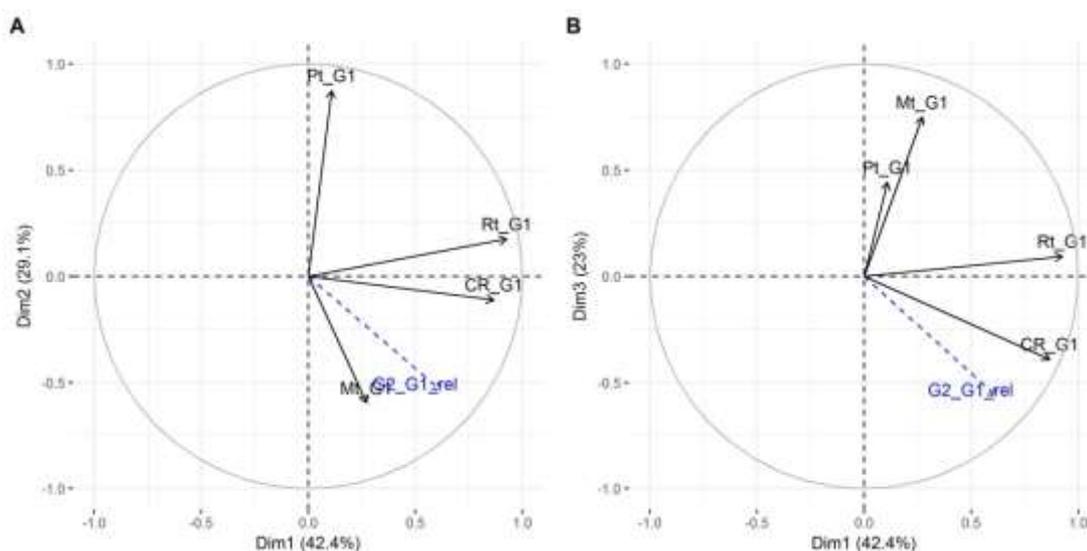


Figure 4.34. Cercles de corrélation de l'ACP selon les axes 1-2 (A) et 1-3 (B). La variable supplémentaire quantitative d'expansion de stock relatif ($G2_G1_rel$), ne rentrant pas dans la création des axes, est représentée en bleu.

4.4.2 Typologie des strates forestières fondée sur les flux de bois

Quatorze facies dynamiques ont été identifiés (Tableau 4.14 ; Figure 4.35), et ont été numérotés en fonction de leur indice d'expansion décroissant (Figure 4.37). Le diagramme des flux est figuré en figure 4.37. Leur projection dans les 2 premiers plans principaux est présentée en figure 4.36. Le détail de composition des facies est fourni en annexe IV.11.

4.4.2.1 Observations générales

A ce niveau d'analyse, la variabilité de l'expansion observée (*i.e.* 80% de l'expansion totale ; voir 3.4) couverte par chaque groupe augmente fortement (de 24% à négligeable). De même, l'IE présente des gradients beaucoup plus marqués, allant de plus de 8 à des niveaux négatifs (strates contribuant négativement à l'expansion, c'est-à-dire en décapitalisation de stock).

On peut remarquer que la classification est fortement influencée par les essences. Certaines essences ont des comportements très spécifiques. C’est le cas des châtaigniers, qui connaissent de très fortes mortalités et du douglas qui présente une croissance importante.

En règle générale, les résineux présentent de plus fortes croissances que les feuillus. Les classes « divers feuillus » et « divers résineux » présentent aussi globalement des croissances plus fortes que les feuillus et les résineux identifiés individuellement.

Cependant, même si les essences influencent fortement la classification, certains milieux (comme la haute montagne) ou propriété (différence entre privé et public) ont également un rôle important. **Ce résultat conforte notre choix de classification.**

4 - Résultats

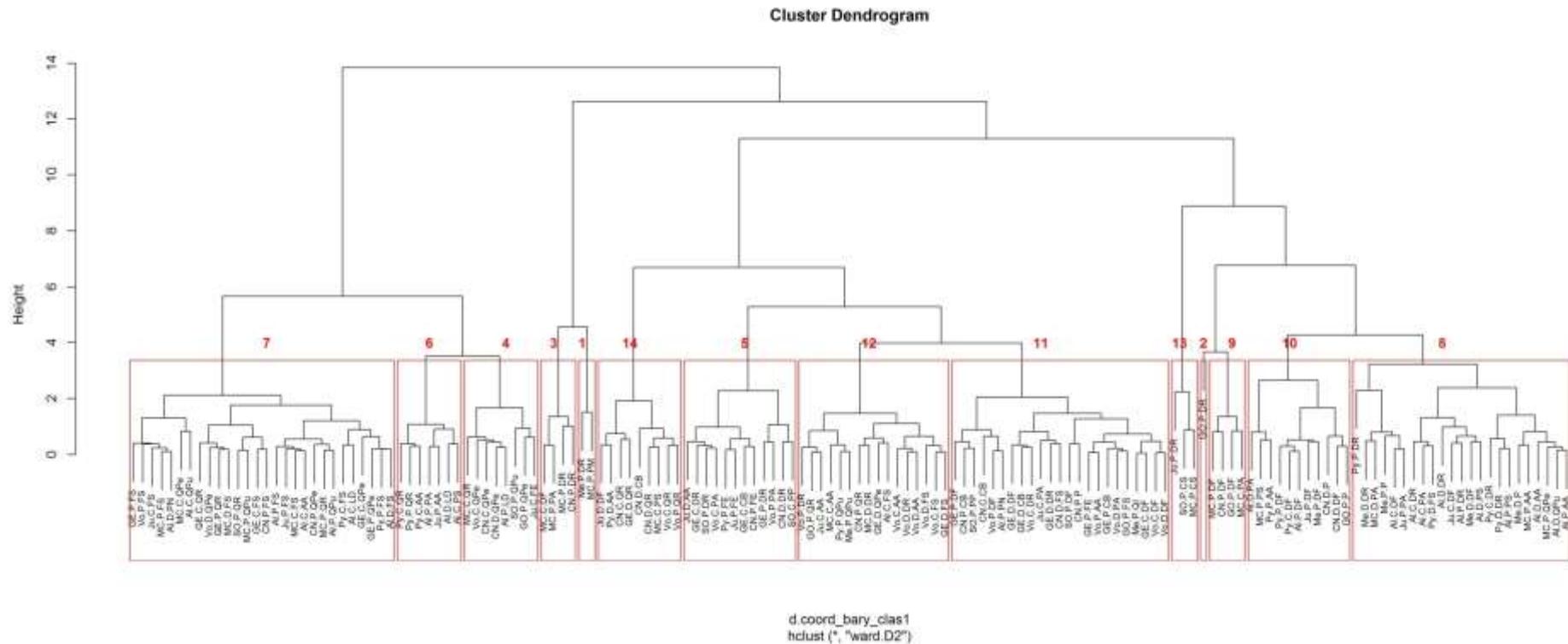


Figure 4.35. Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique appliquée aux centres de gravité des strates GRECO x propriété x essence ligneuse. Le dendrogramme a été construit à partir des 3 axes principaux de l'ACP. 14 facies dynamiques (cadres rouges) primaires ont été identifiés.

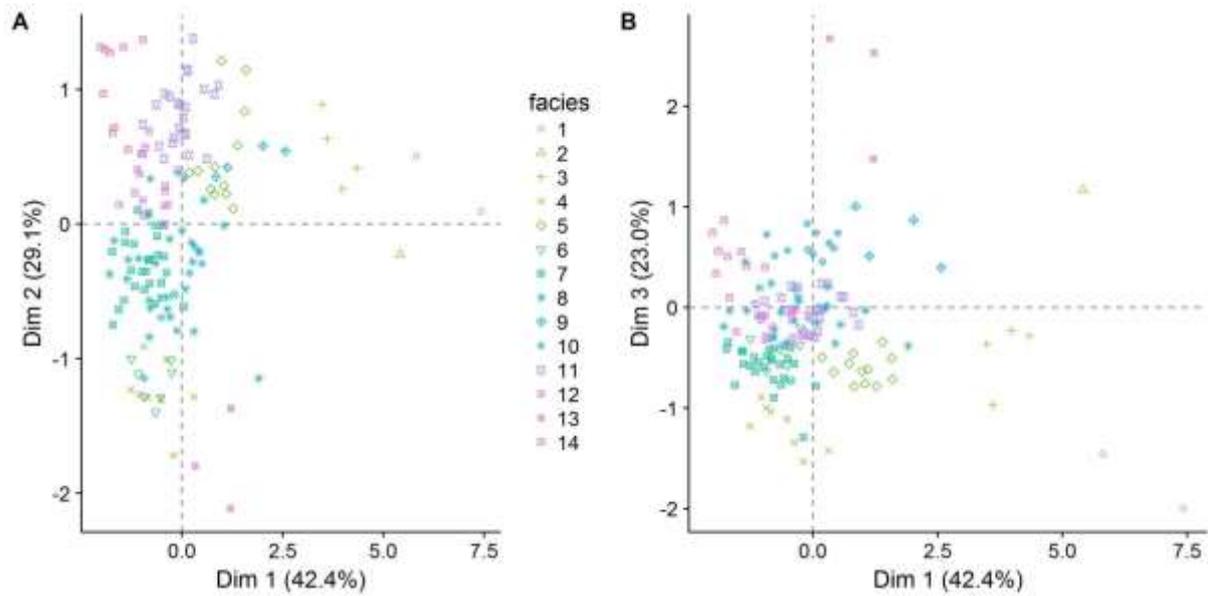


Figure 4.36. Représentation des facies dynamiques identifiés par classification dans les plans 1-2 et 1-3 de l'ACP

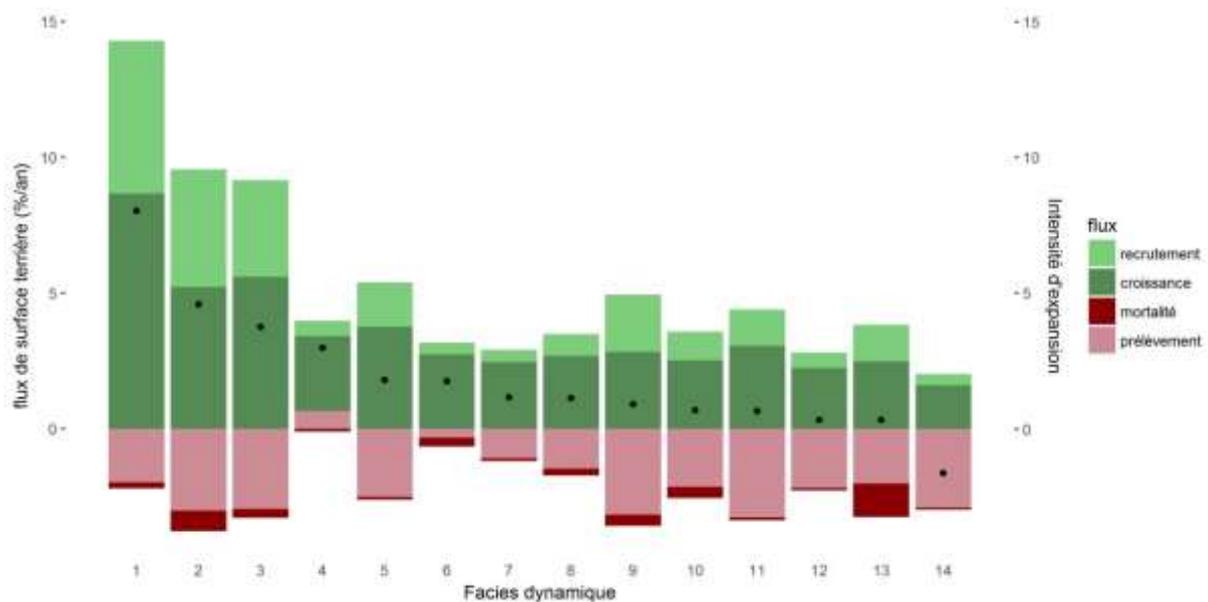


Figure 4.37. Diagramme des flux relatifs annuels pour chacun des 14 facies dynamiques identifiés par la classification hiérarchique

4 - Résultats

Facies	Description	Part du facies dans la surface terrière initiale (%)	Part du facies dans l'expansion totale (%)	IE du facies	Part du facies dans l'expansion totale par profil diamétrique (%)					Dynamique		
					1	2	3	4	5	CR Et Rt	Pt	Mt
1	Douglas du massif central privé	0,6	4,6	8,0	1,3	1,6	1,7	0	0	+	0	-
2	Divers résineux du grand ouest privé	0,2	0,9	4,6	0	0,9	0	0	0	+	0	+
3	Résineux des forêts privées du massif central, et du Centre-Nord	1,7	6,5	3,8	1,0	2,4	3,1	0	0	+	+	-
4	Chênes (essentiellement sessile) de plaine et de moyenne montagne, de toute propriété	2,9	8,6	3,0	3,9	0,8	0,2	3,0	0,7	-	-	-
5	Feuillus d'accompagnement et résineux de plaine et de moyenne montagne en forêt communale et privée, et dans le Nord / Nord-Est	4,4	7,9	1,8	0,9	2,0	3,8	1,2	0,1	+	+	-
6	Essentiellement résineux de forêts de haute montagne, communales et privées	3,1	5,4	1,8	0	0	0,5	2,9	1,9	-	-	-
7	Hêtres et chênes de forêts essentiellement communales et privées des massifs de moyenne et haute montagne	21,5	24,9	1,2	2,5	1,6	10,4	8,4	2,0	-	-	-
8	Résineux essentiellement de forêts publiques de moyenne et haute montagne dans la moitié sud du pays	10,0	11,3	1,1	0,5	2,2	5,5	2,9	0,3	-	-	0
9	Feuillus divers de forêts privées du quart nord-ouest et du massif central	7,7	6,9	0,9	4,1	2,2	0,5	0,2	0	+	+	+
10	Pins du quart NO et divers feuillus de moyenne et haute montagne, essentiellement en forêts privées	10,5	7,1	0,7	1,9	2,2	3,3	-0,2	0	0	-	+
11	Feuillues (charme et divers) et pins du quart nord-est (plaines et Vosges) et du sud-ouest, essentiellement en forêts privées	21,0	13,7	0,7	3,7	2,2	1,6	6,4	-0,1	0	+	0
12	Hêtres et sapins de moyenne montagne et hêtres et chênes de plaine	10,9	3,6	0,3	1,1	0,1	0,1	2,0	0,3	-	0	0
13	Châtaigniers de forêts privées	3,9	1,3	0,3	1,0	-0,5	0,4	0,4	0	+	-	+
14	Feuillus (essentiellement chêne pédonculé) de forêts domaniales et communales de plaine et de moyenne montagne	1,7	-2,7	-1,6	0	-0,1	-0,1	-1,5	-1,1	-	+	0

Tableau 4.14. Tableau récapitulatif des résultats de la classification globale par GRECO x propriété x essence

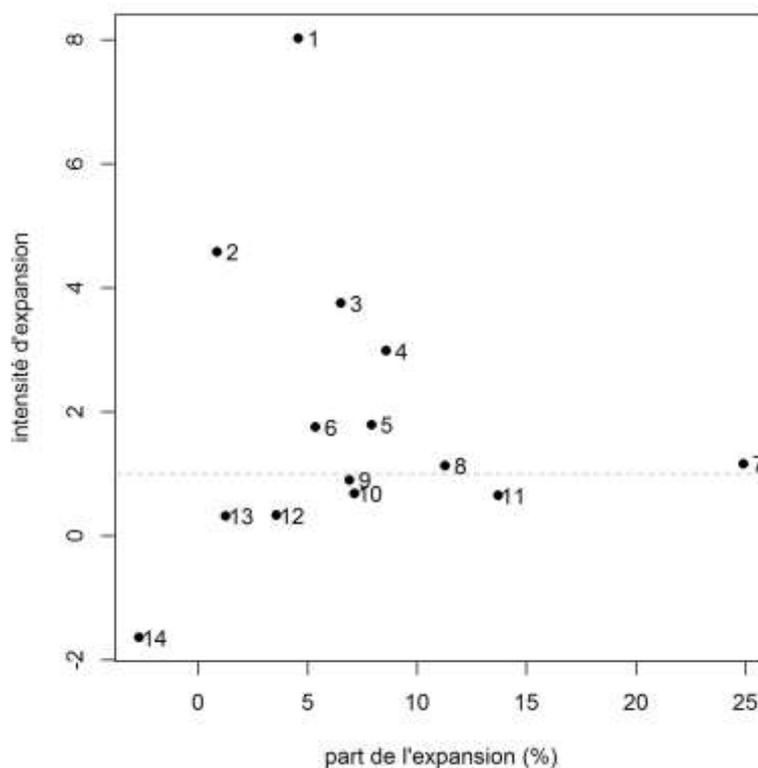


Figure 4.38. Part dans l'expansion totale des facies en fonction de leur intensité d'expansion au niveau GRECO x propriété x essence

Facies dynamique	Part de chaque profil diamétrique dans la surface terrière initiale du facies (%)					Part de chaque profil diamétrique dans l'expansion du facies (%)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	17,5	36,8	45,6	0	0	28,7	33,9	37,4	0	0
2	0	100	0	0	0	0	100,0	0	0	0
3	13,2	35,1	51,7	0	0	15,9	36,9	47,2	0	0
4	33,8	9,1	3,5	35,5	18,1	45,8	8,9	2,2	35,4	7,7
5	9,7	33,0	37,6	18,6	1,1	10,7	25,1	47,9	15,4	0,9
6	0	0	16,3	59,6	24,1	0	0	9,5	54,4	36,1
7	6,5	8,8	31,7	37,2	15,9	10,0	6,5	41,8	33,8	7,9
8	3,5	15,3	48,8	28,8	3,6	4,3	19,1	48,6	25,6	2,4
9	55,7	38,2	5,5	0,7	0	58,5	31,6	7,7	2,2	0
10	15,4	29,5	48,4	6,4	0,4	25,8	31,1	45,4	-2,7	0,3
11	17,5	18,2	13,7	48,2	2,4	26,6	16,1	11,4	46,8	-0,9
12	10,0	6,6	19,8	47,2	16,3	29,2	1,4	3,9	56,3	9,2
13	31,9	27,0	14,9	26,2	0	79,2	-38,4	29,6	29,6	0
14	0	3,0	10,3	43,6	43,0	0	-2,9	-4,4	-54,0	-38,6

Tableau 4.15. Part des profils diamétriques dans la surface terrière initiale et l'expansion de chaque facies dynamique au niveau 2 d'analyse

4.4.2.2 Description et analyse des facies dynamiques GPE

Facies très jeunes à très forte intensité d'expansion (Figure 4.38) :

- (i) **Facies 1** (IE = 8,0 ; 4,6% de l'expansion): il est constitué du **Douglas des forêts privées du Massif Central** et présente les plus forts niveaux relatifs de croissance et de recrutement (**Figure 4.36**). Son stock est ventilé sur les trois premiers profils diamétriques uniquement et **correspond donc à un stock jeune**.
- (ii) **Facies 2** (IE = 4,6 ; 0,9% de l'expansion): il est constitué des **divers résineux des forêts privées du Grand-Ouest**, majoritairement du Douglas, comme l'essence présente dans le premier facies, et de l'épicéa de Sitka, deux essences de plantation à croissance rapide. Il présente des croissances et recrutements élevés, mais aussi une mortalité importante, et des prélèvements plus marqués (**Figures 4.36 et 4.37**). Leur part dans la surface terrière totale française est en nette progression. Leur profil diamétrique est exclusivement le deuxième. Ce sont donc encore des stocks jeunes en installation.
- (iii) **Facies 3** (IE = 3,75 ; 6,5% de l'expansion): il est constitué de **divers résineux et d'épicéas privés des GRECO Centre-Nord et Massif Central**. Comme les facies dynamiques 1 et 2, ces stocks présentent des niveaux de croissance et prélèvements marqués, et sont à nouveau plus prélevés. La répartition du stock sur les profils diamétriques permet d'indiquer que ces forêts sont cependant à un stade de développement plus avancé.

Ces trois premiers facies présentent donc le point commun d'être constitués de forêts résineuses privées à faible diamètre (profils diamétriques principaux 1, 2 et 3 ; Tableau 15). Ce sont donc des forêts jeunes. On peut remarquer la part importante des recrutements dans leurs flux (Figure 4.37). La mortalité qui les caractérise est donc à interpréter comme de la mortalité juvénile. Elles sont à rapprocher des facies 1 et 2 de la première analyse.

Facies à intensité d'expansion marquée (stocks jeunes) :

- (i) **Facies 4** (IE = 3,0 ; 8,6% de l'expansion) : Il est principalement **constitué de chênes (chênes sessile, pédonculé, pubescent) de plaine et de moyenne montagne, dans toutes les propriétés**. Il marque une nette rupture avec les précédents (**Figure 4.37**) et présente des flux de croissance et de prélèvements faibles (**Figure 4.36**), avec des prélèvements souvent négatifs. Sa composition en profils diamétriques montre qu'il est **principalement constitué à la fois de jeunes stocks (profil diamétrique 1), dont l'origine est sans doute du taillis (cas du**

chêne pubescent dans le Sud-Ouest, sessile et pédonculé du NO) et d'arbres plus matures (profil diamétrique 4) qui peuvent correspondre à la strate de futaie de ces anciens TSF. On peut remarquer la forte expansion des stocks jeunes du profil diamétrique 1 (45,8% de l'expansion totale du facies; **Tableau 4.15**) bien qu'ils représentaient une part déjà importante, mais plus modeste, à l'état initial (33,8%),

- (ii) **Facies 5** (IE = 1,8 ; 7,9% de l'expansion) : il est composé de **feuillus secondaires (charme, frêne) et de résineux des plaines et moyenne montagne du Nord-Est et du Sud-Ouest, essentiellement en forêt communale et privée.** Ces stocks connaissent une croissance modeste et un fort prélèvement. Ils sont plus capitalisés que ceux des premiers facies (profil diamétrique 3 principalement) pouvant expliquer leur croissance plus faible et leurs prélèvements plus importants. **Néanmoins, la composante de recrutement y reste importante.** Pour les feuillus en plaine, la présence du charme et du frêne suggère une maturation de forêts récentes ou d'anciens taillis.

Stocks matures à intensité d'expansion >1 :

- (i) **Facies 6** (IE = 1,8 ; 5,4% expansion) : il regroupe des **chênes pédonculés et des résineux (sapin, épicéa, mélèze) de haute montagne, principalement des Alpes et des Pyrénées, en forêt communale et privée.** Ces stocks présentent une structure diamétrique de forêt mature (profils diamétriques principaux 4 et 5). De façon cohérente, ils sont peu prélevés, entraînant leur capitalisation. Le terme de recrutement y est parmi les plus faibles. Cette capitalisation est importante principalement dans les profils déjà les plus matures (le profil diamétrique 5 représentant 24,1% de la surface terrière initiale et 36,1% de l'expansion ; **Tableau 4.15**). Ce facies est à rapprocher du facies 4 de l'analyse précédente.
- (ii) **Facies 7** (IE = 1,2 ; 24,9% de l'expansion) est constitué de **hêtres et de chênes (chênes rouvres, pédonculés et pubescents) des forêts privées et communales des massifs de montagne français et des plaines du Nord et de l'Est.** De profil dynamique similaire au facies 6, il est marqué par des niveaux de prélèvements intermédiaires, plus marqués, qu'on peut relier à une meilleure facilité d'accès à ces forêts. Ce facies, relativement mature (profils diamétriques 3 et 4 majoritaires), représente une part importante de la forêt française car il cumule à lui seul 22% de la surface terrière initiale et un quart de l'expansion totale. On peut remarquer la part importante du profil diamétrique 3 dans l'expansion de ce facies (41,8% ; **Tableau 4.15**). **A la fois son profil dynamique, sa structure diamétrique, et sa distribution géographique et en propriété, en font une prolongation du facies 6 dans des conditions d'accessibilité probablement supérieures.**

- (iii) **Facies 8** (IE = 1,1 ; 11,3% de l'expansion) : il regroupe essentiellement **des résineux de haute et moyenne montagne** (Alpes, Pyrénées, Massif Central et Jura) **et de toute propriété**. Ces strates montrent **des profils de mâturs** (profils diamétriques 3, 4 et 5 majoritaires), et des niveaux de prélèvements faibles, mais supérieurs à ceux du facies 6 (haute montagne exclusive), qui expliquent leur moindre intensité de capitalisation.

Facies contribuant à l'expansion, à IE < 1 (compartiments dont la part dans la ressource totale diminue) :

- (i) **Facies 9** (IE = 0,9 ; 6,9% de l'expansion) : il regroupe **des « divers feuillus » de forêts privées** (châtaignier, bouleau, tremble, frêne, charme, **Tableau 4.3**) **dans le quart Nord-Ouest du pays et le Massif Central**. Ces essences sont essentiellement des essences d'accompagnement et de sous-étage, et **trois d'entre elles sont significatives dans les peuplements de taillis et TSF** (charme, bouleau, châtaignier). Ce stock est de faible diamètre (profils diamétriques 1 et 2 majoritaires, présence des profils 3 et 4) et le terme de recrutement est le plus important après celui des trois premiers facies (**Figure 4.37**). Les prélèvements et la croissance sont plutôt marqués. La mortalité significative, surprenante pour un groupe où les prélèvements existent, est sans doute à relier à la présence du châtaignier (voir facies 13 ci-dessous). **La structure diamétrique, la composition en essences, et le niveau des prélèvements suggèrent qu'il s'agit de peuplements qui peuvent avoir une origine de taillis**, exploités pour le bois de chauffage.
- (ii) **Facies 10** (IE = 0,7 ; 7,1% de l'expansion): il est composé de **pins du quart Nord-Ouest du pays et de divers feuillus (surtout du châtaignier) des massifs de moyenne et haute montagne, pour l'essentiel en forêt privée**. Ce stock présente de faibles diamètres (profils diamétriques 2 et 3 majoritaires) bien que l'ensemble des profils soient représentés. Les prélèvements sont faibles, mais la croissance y est elle aussi modérée, expliquant une intensité d'expansion faible. On peut remarquer une décapitalisation dans le profil diamétrique 4 (-2,7% de l'expansion du facies ; **Tableau 4.15**) alors que les stocks du profil diamétrique 5 se maintiennent. La mortalité est présente dans ce facies (**Figures 4.36 et 4.37**), et est à relier à nouveau à la présence du châtaignier dans le stock des feuillus divers.
- (iii) **Facies 11** (IE = 0,7 ; 13,7% de l'expansion) : il correspond à **des feuillus et des pins de forêts essentiellement privées du Nord-Est et du Sud-Ouest de tradition forestière ancienne**. Ce groupe est donc à rapprocher du facies 5 de l'analyse du niveau 1, et peut correspondre à des situations très hétérogènes. On retrouve ainsi dans ce facies le pin maritime des forêts privées du sud-ouest

(Figure 4.39) qui présente de forts prélèvements, principalement dans les départements des Landes et de la Gironde. Leur part dans la forêt française est importante (21,0%) mais tend à diminuer ($IE < 1$). **Le niveau relatif des prélèvements y est des plus élevés parmi les facies (Figure 4.36)**. Ce facies est constitué de stocks jeunes (profils diamétriques 1 et 2), dont l’expansion est importante (respectivement 26,6% et 16,1% de l’expansion totale du facies), et de stocks plus matures (profil diamétrique 4) qui pèsent plus de 50% de l’expansion de ce facies. Les stocks du profil diamétrique 5 sont les seuls à présenter une décapitalisation, signe d’un rajeunissement de ce facies. **La capitalisation dans les profils jeunes et la décapitalisation dans les profils matures montre un signe de gestion appuyé par les forts prélèvements observés.**

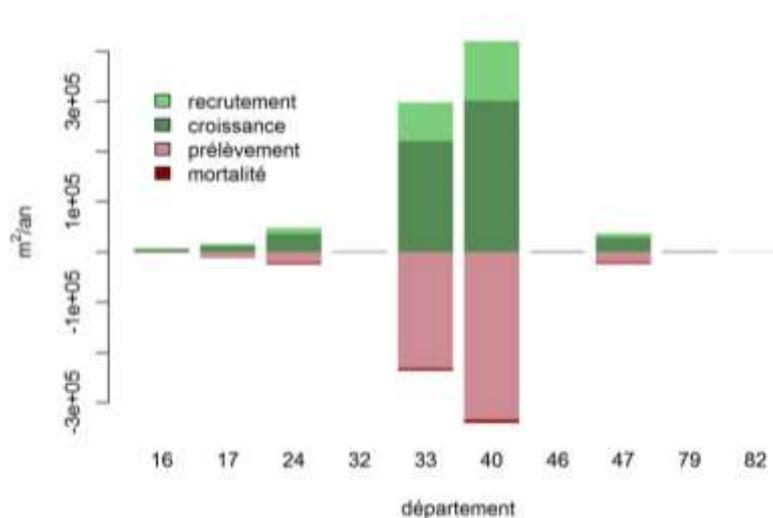


Figure 4.39. Histogramme des flux pour la strate des pins maritimes des forêts privées du sud-ouest

Facies de contribution nulle ou négative à l’expansion :

- (i) **Facies 12** ($IE = 0,3$; 3,6% de l’expansion) : ce stock, qui est important dans la forêt française (près de 11%) est composé de **hêtraies et sapinières de montagne, et de chênaies et hêtraies de plaines, avec une domination de strates de forêt domaniale et communale sur l’ensemble du territoire**. Les prélèvements déjà marqués entrent en équilibre avec un taux de croissance faible et un recrutement minimal **conduisant à une expansion anecdotique**. Ce stock est équilibré en structure diamétrique (profil diamétrique 4 majoritaire). On remarque toutefois la capitalisation forte des profils diamétriques 1 (29,2% de l’expansion totale du

facies) et 4 (56,3%) comparée à leur poids initial (10,0% et 47,2% respectivement ; **Tableau 4.15**).

- (ii) **Facies 13** (IE = 0,3 ; 1,3% de l'expansion) : ce facies anecdotique correspond au **châtaignier des forêts privées du Sud-Ouest et du Massif Central** (exemple pour le Massif Central ; **Figure 4.40**). Ce stock à faible diamètre (profil diamétrique 1 majoritaire ; 31,9% de la surface terrière initiale ; **Tableau 4.15**) montre aussi un terme de recrutement important, à interpréter comme la maturation de taillis de châtaignier. **Il connaît une très forte mortalité, à rapprocher des problèmes sanitaires massivement rencontrés par cette essence.** On peut souligner la très forte part de l'expansion représentée par le profil diamétrique 1 (79,2%) et la très forte décapitalisation du profil diamétrique 2 (-38,4%).

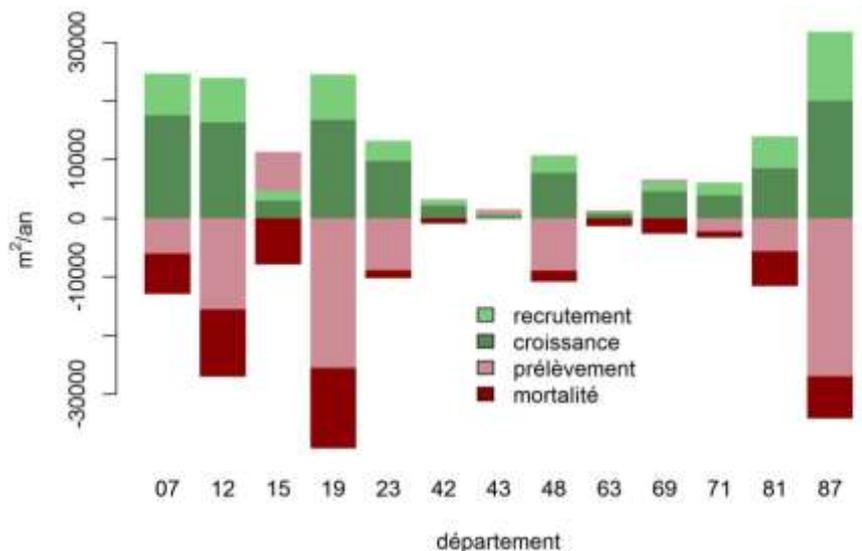


Figure 4.40. Histogramme des flux pour la strate des châtaigniers des forêts privées du Massif Central

- (iii) **Facies 14** (IE = -1,6 ; -2,7% de l'expansion) : ce stock est composé essentiellement de **feuillus des forêts publiques (chêne pédonculé prédominant), principalement domaniales, du Centre-Nord et du Nord-Est du pays.** Son intensité d'expansion négative marquée souligne la forte décapitalisation à l'œuvre dans ce stock. Il présente une croissance faible et les prélèvements les plus marqués des 14 facies. Il est constitué de **stocks matures** (profils diamétriques 4 et 5 majoritaires). On peut remarquer que la décapitalisation est particulièrement importante dans le profil diamétrique 4 (-

54,0% ; Tableau 4.15). Il traduit l’arrivée à maturité, et l’exploitation, de forêts publiques feuillues dont la mise en valeur est déjà ancienne.

4.4.3 Synthèse

Un schéma récapitulatif des 14 facies explicités et de leur regroupement suggéré est présenté en Figure 4.41.

A ce niveau d’analyse, la finesse fournie par l’analyse des essences permet d’identifier une hétérogénéité beaucoup plus forte, marquée par un gradient élargi d’intensités d’expansion (de -1,6 à 8), et des facies plus subtiles. **Le déficit de prélèvements est à nouveau un phénomène très général**, même s’il ne concerne pas les facies de forêt publique 12 et 14, proches de l’équilibre ou en décapitalisation.

Quatre ensembles forestiers de nature très distincte apparaissent très nettement comme responsables de l’expansion observée (*i.e.* 80% de l’expansion totale ; voir 3.4) :

- (i) un premier ensemble défini par **les facies 1 à 3 et 10** en partie (pins du NO), il s’agit de **peuplements de résineux en forêt privée (divers résineux, pins, douglas, épicéa) situé dans le Grand-Ouest, le Centre-Nord, et dans le Massif central**. Il s’agit d’un stock de structure diamétrique jeune, qui fait écho aux programmes de boisements récents et plus anciens (fin du FFN dans le massif central),
- (ii) un second ensemble défini **essentiellement par des résineux et des chênes pédonculés de haute montagne, de toute propriété (facies 8) ou en communale et privée (facies 6)**, auxquels il faut **partiellement adjoindre le facies 10** (divers feuillus de haute et moyenne montagne).

Le premier ensemble (jeunes résineux privés) représente **plus de 12% de l’expansion (*i.e.* moins de 1/5)**, et le second groupe (stocks majoritairement résineux de haute montagne) représente **autour de 20% de l’expansion (*i.e.* plus de 1/5)**.

- (iii) un troisième ensemble remarquable, **fondé sur les grandes essences feuillues sociales**, comprenant les jeunes chênes de plaine du Nord et Sud-Ouest de toute propriété (**facies 4**, 9% de l’expansion), les chênes et hêtres plus matures des plaines du NE et des massifs français en forêt communale et privée (**facies 7** ; 25% de l’expansion) et les divers feuillus d’accompagnement et de taillis des forêts privées du quart NE et du massif central (**facies 9**, 7% de l’expansion), auxquels il faut adjoindre les châtaigniers privés du SO et du MC, eux aussi issus de taillis (facies 13 ; 1% de l’expansion) mais présentant une dynamique très particulière

liée à leur forte mortalité. C'est donc au total **42% (2/5) de l'expansion qui trouve son origine au sein d'un stock de feuillus sociaux ou d'accompagnement dont l'origine plus ou moins lointaine, au moins en partie, en taillis et TSF est manifeste,**

- (iv) un ensemble formé par des **stocks traditionnels essentiellement des forêts privées des régions du Nord-Est et du Sud-Ouest du pays, à base de feuillus et résineux**, qu'il s'agisse des forêts privées de feuillus divers et pins (**facies 11**, 13,7% de l'expansion) ou des forêts communales et privées de feuillus secondaires et résineux (**facies 5**). **Ce groupe représente 18% de l'expansion (1/5).**

Enfin, certaines forêts publiques, **essentiellement domaniales**, ont une contribution nulle à cette expansion, ce qui cache en réalité une hétérogénéité, une décapitalisation dans les feuillus (dont chênes) des forêts publiques essentiellement domaniales de plaine (NE, Centre Nord, **facies 14**), et une capitalisation très faible mais positive dans les hêtraies-chênaies et hêtraies-sapinières publiques, de plaine et de montagne sur le territoire (**facies 12**).

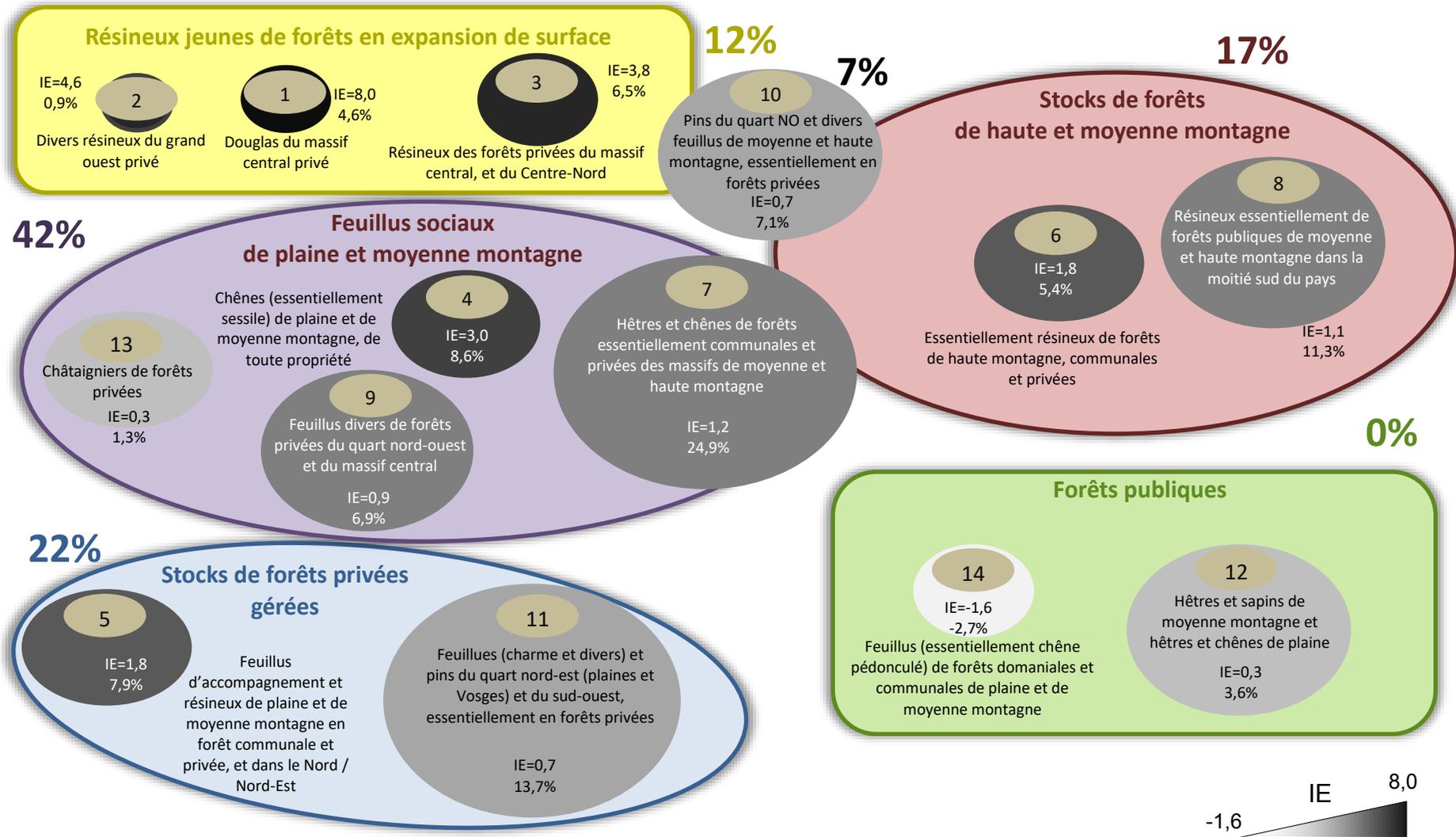


Figure 4.41. Schéma des 14 facies identifiés au niveau 2 de l'analyse. Les pourcentages correspondent à la part de l'expansion décrite expliquée. La taille des ronds représentant les strates est proportionnelle à la taille dans la surface terrière initiale.

En résumé

A ce niveau d'analyse GRECO x propriété x essence, et en idéalisant encore davantage, l'expansion décrite (*i.e.* 80% de l'expansion totale ; voir 3.4) paraît pouvoir s'interpréter selon 4 compartiments :

- (i) un compartiment prépondérant, formé par les feuillus sociaux de plaine et moyenne montagne de structure jeune, à relier à la maturation de taillis anciens (2/5 de l'expansion décrite),
- (ii) de jeunes résineux de forêts privées du Massif Central et du Nord-Ouest (<1/5 de l'expansion décrite),
- (iii) des stocks essentiellement résineux de forêts de haute montagne de toute propriété (>1/5 de l'expansion décrite),
- (iv) des stocks de forêts privées traditionnelles feuillues et résineuses (Nord-Est et Sud-Ouest), où l'intensité de gestion permet une accumulation de bois (1/5 de l'expansion décrite).

Il est donc important, pour les politiques de forestières futures de distinguer les différents enjeux de mobilisation de bois : un enjeu en montagne (20%) lié à des forêts difficilement prélevables (conditions de terrain difficiles), un enjeu futur pour de jeunes ressources résineuses ou ressources feuillues en maturation (20 + 40%), et un enjeu d'intensification dans des forêts privées déjà gérées (20%).

Alors que les dernières forêts semblent directement utilisables, les deuxièmes correspondent à des forêts encore, à priori, jeunes pouvant, ne pouvant, pour certaines, pas encore être exploitées. Les premières nécessiteraient une amélioration forte des techniques de débardage en milieu difficile et une amélioration de l'accessibilité des forêts. Vu ces contraintes, il semble possible d'augmenter les prélèvements dans ces dernières mais impossible d'obtenir un équilibre croissance-prélèvement.

5 Discussion

5.1 Aspects méthodologiques

5.1.1 Flux de prélèvements de bois

La sous-estimation des prélèvements en AM nous a contraints à les estimer à partir d'un bilan de flux. Cette méthode se base sur des approximations des termes du bilan liées à la nature temporaire des points de l'inventaire forestier. Elle s'est montrée cohérente et nous permet de comparer les différentes strates entre elles. Cette approximation a néanmoins entraîné, pour certaines strates, l'obtention de prélèvements négatifs, aberrants. L'analyse de ces prélèvements négatifs nous a amené à écarter la GRECO Corse ne présentant que des prélèvements négatifs (**Tableau 4.6**). Même si dans l'analyse GRECO x propriété la suppression des strates représentant une très faible part dans la surface terrière totale a entraîné la suppression de l'ensemble des prélèvements négatifs, dans l'analyse par essence, certains subsistent. Ces résultats sont, à priori, la preuve de prélèvements très faibles dans ces strates. De plus, leur occurrence est plus forte en forêt communale (**Tableau 4.6**) que dans les autres types de propriété. Cela pourrait être lié à la soumission de forêts communales pendant la période d'étude, entraînant une augmentation de la surface terrière à t2. En effet, les forêts communales non soumises sont répertoriées comme forêts privées par l'IFN.

5.1.2 Intérêt d'une analyse à deux niveaux hiérarchiques

Notre étude, à plusieurs niveaux permet d'avoir une vision complète de la dynamique. En effet, l'analyse par GRECO x propriété permet d'étudier les variations de surfaces, ce qui n'est pas possible avec l'analyse par essence au niveau de l'arbre. Cependant, nos résultats de la deuxième classification mettent en évidence le rôle de certaines essences dans la création de faciès dynamiques (*e.g.* le douglas et le châtaignier) et conforte notre choix de partition, et de séparation des procédures de classification. Elle a de plus l'avantage de pouvoir s'appuyer sur des profils diamétriques du stock, ce qui est essentiel pour l'identification du stade de maturité des forêts sous-jacentes.

La partition par essence a permis de créer des faciès plus homogènes que ceux identifiés à partir des strates GRECO x propriété. En effet, elle permet, par exemple, de séparer au sein de la strate des forêts privées du Massif Central à forte croissance et forte mortalité, les forêts de châtaignier, présentant une mortalité importante, et les plantations de douglas et autres résineux, à forte croissance, des autres peuplements ne présentant pas la même dynamique. Cependant, on observe encore de l'hétérogénéité au sein de certains faciès. C'est le cas, par exemple, des faciès 4 et 11 qui présentent à la fois des forêts jeunes (profil diamétrique 1) et matures (profil diamétrique 4 ; **Tableau 4.15**), qui peut correspondre à deux sous-compartiments sous-jacents (taillis maturés, strate de réserves de taillis sous futaie ou TSF). **Cette hétérogénéité au niveau des profils diamétriques aurait pu être prise en compte par une partition, plus fine encore, par GRECO x propriété x essence x classe de**

diamètre. Cependant, cette division multiplie par 4 le nombre de strates étudiées et complexifie fortement l'étude. C'est la raison pour laquelle nous avons préféré adjoindre une information auxiliaire associée à une typologie des profils diamétriques.

5.1.3 Retour sur la mise en œuvre d'une méthode de classification

Afin de constituer des facies dynamique, nous avons utilisé une classification ascendante hiérarchique. Le nombre de classe (*i.e.* facies) a été choisi de façon arbitraire. L'objectif était d'avoir un nombre assez élevé de facies afin de permettre une analyse fine des dynamiques forestières. L'analyse de leurs dynamiques nous a permis, par la suite, de les regrouper en un nombre restreint de classes, permettant une lecture facile de la dynamique forestière française. Ainsi, au niveau 1, sept facies étaient identifiés et ont permis d'identifier trois compartiments responsables de l'expansion : des forêts de résineux jeunes, des forêts de montagne et des forêts privées gérées. Au niveau 2, 14 facies étaient identifiés et ont été regroupés en 4 compartiments responsables de l'expansion et un compartiment de forêts publiques stationnaire en stock. **La cohérence entre les deux systèmes de décomposition de l'expansion est très marquée.**

5.2 Aspects de la dynamique des forêts

Nos résultats montrent qu'**aucune corrélation n'existe entre croissance et prélèvement (Tableau 4.8)**. Les forêts qui poussent le plus rapidement ne sont pas plus prélevées que les autres. Cependant, il existe une **corrélation négative entre prélèvement et mortalité (-0.37 ; Tableau 4.8)**, révélant un effet de gestion sur la mortalité. Deux causes, l'une technique, l'autre écologique, peuvent l'expliquer. Tout d'abord, un arbre ne peut être comptabilisé comme mort par l'IFN que s'il n'a pas été prélevé. Or, dans les zones à forte gestion, les arbres dépérissants ou morts (par tempête par exemple) sont généralement prélevés rapidement. Ce biais dans les relevés de la mortalité peut également expliquer les faibles mortalités observées globalement par notre étude. Par ailleurs, la mortalité reste aussi un phénomène largement densité-dépendant, plus marquée là où le stock à l'hectare est plus élevé (Westoby, 1984). Cet effet se manifeste nécessairement dans notre étude.

L'étude de la densité des peuplements montre qu'elle est négativement corrélée à la croissance (**Figure 4.23**). Cela est confirmé par l'étude des profils diamétriques à l'intérieur des facies (**Tableau 4.14**) qui montre que les profils présentant le plus de gros bois, qui sont certainement les plus denses en volume, sont aussi ceux qui présentent les plus faibles croissances (exemple du facies 14).

Globalement, **l'intensité d'expansion est positivement corrélée à la croissance, aux recrutements et aux variations de surface ainsi que négativement aux prélèvements (Tableau 4.8).**

5.3 Analyse des facies dynamiques

Les facies GRECO x propriété présentant les plus fortes IE sont ceux du MC privé (IE = 1,4 ; **Tableau 4.12**) et du NO privé (IE=1,4). Ces deux facies présentent de très fortes croissances. **L'analyse par essence a montré que cette forte expansion est principalement due à la présence de boisements résineux à forte croissance** (Douglas pour le MC privé et Douglas et Epicéa de Sitka pour le NO privé ; **Tableau 4.3**). Le Douglas a d'ailleurs été une des essences privilégiées par le FFN (Cottin, 1995 ; Pourtet, 1972). **Ces forêts présentent des arbres à faibles diamètres attestant de la relative jeunesse des peuplements**. Alors que les boisements du FFN ont principalement été effectués au début de la période 1946-1999 (voir partie I – 1.3.4), les boisements du Grand-Ouest sont plus récents, expliquant la plus grande variation de surface au niveau 1 de ce facies.

Derrière ces deux premiers facies, on trouve celui composé essentiellement des forêts privées de Me (IE = 1,2) qui présente une forte variation de surface. **Ces forêts sont donc en forte expansion. Ce phénomène est particulièrement connu dans les forêts méditerranéennes où il est lié à la déprise agricole** (Chakir et Madignier, 2006, Cavailhès et Normandin, 1993).

De façon opposée, les forêts publiques de plaine et de moyenne montagne du Nord-Est présentent la plus faible IE (IE = 0,5 ; **Tableau 4.12**). Ces forêts présentent à la fois de faibles croissances et de faibles variations de surfaces. L'analyse par essence a montré une forte décapitalisation des feuillus dans ces strates. Cependant, ces forêts étaient initialement fortement capitalisées (*i.e.* elles sont principalement composées d'arbres à diamètres importants), expliquant les prélèvements de ces arbres.

L'analyse par essence a permis de montrer le comportement très spécifique de certaines essences. Par exemple, les châtaigniers du sud-ouest et du Massif Central connaissent de très fortes mortalités entraînant ainsi une forte diminution de leur part dans la surface terrière totale des forêts. La maladie de l'encre, arrivée au XVIII^{ème} siècle en Europe (Vannini et Vettraino, 2001), est connue pour entraîner le dépérissement puis la mort des châtaigniers et peut expliquer cette forte mortalité observée.

Cependant, certaines GRECO présentent aussi des dynamiques particulières. On peut, par exemple, retenir le Nord-Est et le Sud-Ouest, zones de tradition forestière, dont les forêts sont fortement prélevées ou les GRECO des hautes montagnes (Alpes et Pyrénées) qui, au contraire, sont peu prélevées, du fait du handicap physique à leur exploitation.

De manière générale, on remarque que **les strates qui décapitalisent sont principalement celles présentant de faibles croissances associées à de forts prélèvements. Ces strates sont principalement des strates de forêts publiques et, le plus souvent, des forêts domaniales. On retrouve souvent des feuillus, et principalement des chênes et des hêtres, dans ces strates**. Alors que les forêts communales et privées qui décapitalisent sont des forêts présentant des diamètres moyens élevés (>20 cm), cela n'est pas le cas pour les forêts

domaniales qui présentent parfois des diamètres moyens faibles (14,78 cm pour Ju.D.DF ou 11,9 cm pour CN.D.CB).

De même, **les strates dont le poids augmente sont celles présentant de faibles prélèvements, quelle que soit leur croissance. Celles présentant une forte croissance sont plutôt liées à des strates en expansion de surface (comme les divers résineux du Grand Ouest privé) alors que celles présentant de faibles croissances correspondent plutôt à des forêts en maturation (comme les forêts de haute montagne, essentiellement résineuses, communales et privées).**

Cette étude se base sur les deux premiers inventaires et donc sur une période allant, en moyenne par département, de 1983 à 1995 (**Tableau 4.4**). Cette période est assez récente à l'échelle forestière mais depuis cette époque, il y a eu certaines modifications dans la gestion des forêts françaises (*e.g.* Arrêt du FFN). **Il serait donc intéressant, par la suite d'étudier ces flux sur une période plus récente et de comparer les résultats obtenus avec ceux présentés ici.**

5.4 Compartiments de la forêt et systèmes de production responsable de l'expansion en stock des forêts

L'analyse au niveau 1 permet d'identifier 3 compartiments responsables de l'expansion décrite (*i.e.* 95% de l'expansion totale ; voir 3.4) : les forêts privées récentes (1/4 de l'expansion), les forêts de haute montagne toutes propriétés confondues (1/4 de l'expansion) et les forêts privées gérées (1/2 de l'expansion ; **Figure 4.42**).

$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$
Forêts privées récentes	Forêts de haute montagne	Forêts privées gérées

Figure 4.42. Idéalisation des compartiments responsables de l'expansion en stock décrite (95% de l'expansion totale) identifiés au niveau 1. Les ratios correspondent à la part que chaque groupe représente dans l'expansion décrite.

Cette analyse ne permet toutefois pas de relier ces compartiments à des systèmes de production précis et à leur trajectoire historique. C'est ce qui a été permis par l'analyse au niveau 2.

A ce niveau, 4 compartiments sont identifiés comme responsables de l'expansion décrite (*i.e.* 80% de l'expansion totale ; voir 3.4) :

- (i) Les forêts résineuses (principalement douglas et épicéa) privées du Massif Central et du Nord-Ouest. **Ces forêts sont des forêts jeunes, à l'évidence issues des**

- boisements du FFN** (principalement dans le MC) et de boisements plus récents plus récents (dans le Nord-Ouest, voir partie I),
- (ii) des **forêts de haute montagne** essentiellement, majoritairement résineuses mais aussi feuillues (chêne pédonculé, facies 6), **toutes propriétés confondues**. Ces forêts sont de stade beaucoup plus mature, avec de faibles recrutements. C’est typiquement la forêt résineuse de montagne, qui cache une diversité élevée (pins, sapins, mélèze, épicéa, *etc.*), et **dont l’exploitation est physiquement contrainte**,
 - (iii) un troisième compartiment, très emblématique, comprend : les chênes jeunes de plaine toute propriété (9%), puis les chênes et hêtres de moyenne montagne plus matures (communal et privé) (25%), et enfin les divers feuillus d’accompagnement du privé dans des régions forestières traditionnelles, de stade intermédiaire (8%), auxquels il faut ajouter les châtaigneraies. **Ces essences sont emblématiques de l’ancien système prédominant du taillis et TSF en France (chênaies de plaines, hêtraies altitudinales et châtaigneraies de moyenne montagne) qui a fait l’objet d’une conversion massive** (Degron, 1999) ou d’un abandon (châtaigneraie, hêtraies altitudinales ; Decoopman et Derioz, 1994 ; Chollet et Demarcq, 1998),
 - (iv) la forêt **privée traditionnelle, gérée mais dont les prélèvements restent inférieurs à la croissance**, parmi laquelle on trouve des divers feuillus et des résineux dont les pins.

Ces faits sont représentés dans la **figure 4.43**.

1/5 Jeunes résineux privés	1/5 Résineux de haute montagne	1/5 Stocks de forêts privées gérées	2/5 Feuillus sociaux de plaine et moyenne montagne
-------------------------------------	-----------------------------------------	-------------------------------------------------	----------------------------------------------------------

Figure 4.43. Idéalisation des compartiments responsables de l’expansion en stock décrite (80% de l’expansion totale) identifiés au niveau 2. Les ratios correspondent à la part que chaque groupe représente dans l’expansion décrite.

Les individus écartés de notre analyse de niveau 2 représentent 10% de la surface terrière initiale et 20% de l’expansion totale (voir 3.4). Ces individus de faible taille n’ont pas pu être analysés ici mais ont une intensité d’expansion forte (IE = 2) et contribuent à eux seuls à 1/5 de l’expansion totale.

5.5 Conséquences pour la gestion et la mobilisation des bois

Nos résultats ont montré qu'il est possible de distinguer quatre groupes de forêts qui contribuent à l'expansion (**Figure 4.47**). Parmi ces groupes, deux se présentent comme des peuplements relativement jeunes (les jeunes résineux privés et les feuillus sociaux de plaine et de moyenne montagne) qui ne forment pas des **ressources immédiatement disponibles (à l'exception d'une utilisation potentielle pour le bois de chauffage pour les feuillus sociaux)**. Ces deux faciès représentent à eux seuls 3/5 de l'expansion. Le troisième groupe est constitué des **résineux de haute montagne. Ces stocks sont peu prélevés du fait des fortes contraintes physiques du milieu** (fortes pentes, faible densité de réseau de desserte ; IGN, 2012). L'amélioration des techniques de débardage et la densification du réseau de desserte pourrait permettre une petite augmentation de ces prélèvements mais il semble cependant impossible d'égaliser la croissance. Enfin, le quatrième groupe est constitué des forêts privées gérées. Ces forêts sont moins gérées que les forêts publiques, expliquant leur plus forte expansion. Dans le cadre de politiques d'intensification des prélèvements forestiers, il semble donc que ce soit principalement dans ce dernier groupe, qui représente 1/5 de l'expansion forestière, que les efforts doivent se concentrer. **Toutefois, les stocks de bois des forêts privées restent en moyenne plus faibles qu'en forêt publique, et le choix de ne pas prélever l'intégralité de l'accroissement biologique peut être étayé dans une perspective de gestion visant l'accroissement de valeur du capital forestier.**

Une partie des jeunes résineux identifiés proviennent des boisements du FFN effectués principalement au début de la période 1946-1999. Sur la période étudiée dans notre analyse (en moyenne 1983-1995 ; **Tableau 4.4**), ces peuplements étaient encore jeunes. Mais actuellement, ils commencent à atteindre leur âge d'exploitabilité et constituent donc un nouveau stock utilisable.

Résumé chapitre IV

L'étude des flux de surface terrière a permis d'étudier plus en détail les mécanismes d'expansion de la forêt française. Une première approche par GRECO et type de propriété a permis d'étudier ces flux à un grain assez large et de les lier aux changements de surfaces. Une analyse plus détaillée a été effectuée grâce à une seconde approche par GRECO, type de propriété et essence. Cependant, cette dernière est liée aux arbres et non aux points d'inventaires et ne permet donc pas une analyse des changements de surface. Aux deux niveaux, des faciès dynamiques de la forêt française ont été identifiés.

Nos résultats ont montré que l'intensité d'expansion (rapport entre la part d'une strate dans l'expansion totale et la part que représente cette strate dans la forêt initiale) est principalement liée positivement à la croissance et négativement aux prélèvements.

Les forêts présentant les plus fortes intensités d'expansion sont les forêts jeunes (*i.e.* à faible diamètre) de résineux (principalement Douglas et épicéa de Sitka) du Massif Central et du grand-ouest. Ces forêts présentent une forte croissance (dont une forte part de recrutement) et de très faibles prélèvements.

Un autre groupe de forêt présente une intensité d'expansion relativement élevée. On y retrouve, entre autre, les forêts de haute montagne. Ces forêts, plus capitalisées que les précédentes, présentent également de très faibles prélèvements, liés aux contraintes physiques du milieu, mais ont une croissance faible. Alors que le premier groupe correspond à des forêts en expansion de surface, le deuxième correspond à des forêts qui capitalisent et dont la surface n'évolue pas.

Deux autres groupes dont l'intensité d'expansion est plus faible participent à l'augmentation du stock : les forêts privées gérées et les Feuillus sociaux de plaine et moyenne montagne. Ces derniers représentent 2/5 de l'expansion totale et sont à lier à la maturation des taillis et des TSF suite à leur conversion ou leur abandon.

Inversement, les forêts présentant une très faible intensité d'expansion sont des forêts à faible croissance et forts prélèvements, comme les forêts publiques, principalement feuillues à diamètres élevés. Parmi ces forêts, les forêts domaniales présentent le plus souvent une décapitalisation.

La mortalité est globalement faible par rapport aux autres flux, mais elle est très marquée dans les strates de châtaigniers, et particulièrement celle des forêts privées du Massif Central qui sont peu prélevées mais présentent quand même une intensité d'expansion faible.

Les résultats démontrent la nécessité de raisonner l'accroissement éventuel de la mobilisation de bois des politiques forestières actuelles en fonction de contextes forestiers très hétérogènes, et de dépasser une analyse globale fondée sur le taux moyen de prélèvement.

V - Analyse et simulation du stock de bois
des forêts françaises sur un horizon
séculaire

1 Introduction

1.1 Contexte

La partie III nous a permis d'examiner la dynamique du stock de bois sur 40 ans. L'intensité de ces changements amène à s'interroger sur la trajectoire de ce stock sur un horizon temporel plus profond. Le stock sur pied a augmenté trois fois plus vite que les surfaces sur la période 1976-2010 et cette augmentation de forte intensité ne présente aucune saturation. Cependant, cette information, cruciale dans le cadre de politiques de gestion forestière, n'existe pas dans les statistiques du début du siècle (ni dans l'enquête Daubrée, ni dans les statistiques agricoles ; partie II – 2.2) et empêche ainsi toute reconstitution de l'évolution des stocks sur le long terme.

Peu de pays européens ont un inventaire forestier assez ancien pour pouvoir reconstituer une évolution sur le long terme de l'expansion du stock sur pied de leurs forêts (+70% entre les périodes 1921-1924 et 2009-2013 en Finlande ; Henttonen *et al.*, 2017 ; Liski *et al.*, 2006). Dans ce contexte, une voie consiste à essayer d'estimer indirectement ce stock. C'est le cas, par exemple en Suisse où une estimation à partir d'un modèle de la densité de stock de ses forêts entre 1860 et 1951 combinée à une interpolation des données de l'IFN entre 1952 et 2006 a suggéré que le stock des forêts suisses avait pu augmenter de +292% entre 1860 et 2006 (Usbeck *et al.*, 2010).

1.2 Objectifs

Dans ce chapitre, nous proposons un essai de reconstitution du stock de bois à différentes dates situées au voisinage du début du XX^{ème} siècle, par une méthode d'imputation conditionnelle utilisant à la fois les données de densité de stock de l'IFN et les données de surface de trois statistiques anciennes : l'enquête Daubrée (Daubrée, 1912), décrivant l'état des forêts en 1908 et les statistiques agricoles de 1892 et 1929 (ministère de l'agriculture, 1897 et 1936), qui l'encadrent. **Nous avons ensuite essayé de reconstituer, par modélisation, la chronologie d'évolution du stock sur l'ensemble du XX^{ème} siècle, afin de situer les phénomènes actuels dans un temps plus long et de préciser le niveau de plausibilité de la reconstitution antérieure. L'objectif est ici d'identifier à quelles conditions sur l'accumulation de stock net moyen à l'hectare il est possible de restituer les tendances historiques estimées, et parmi l'ensemble de ces dernières, lesquelles sont les plus plausibles.**

Ce chapitre est composé de deux sections (estimations des stocks anciens et simulation) de matériel et méthodes, ainsi que d'une section de résultats.

2 Estimation du stock au voisinage du début du XX^{ème} siècle

2.1 Principe

Les forêts françaises sont très diverses (13/14 des types forestiers identifiés en Europe ; Barbati *et al.*, 2014). Cette diversité représente à la fois une diversité de milieux écologiques (climats et sols) ainsi que de gestion qui peut influencer la densité de stock des peuplements forestiers, que l'on cherche à reconstituer. Une approche de reconstitution conditionnelle à des données de référence doit donc essayer de contrôler le plus possible de facteurs influençant cette variable.

A la fois la variabilité du milieu environnemental (qui conditionne la croissance) et celle de la gestion (notamment les prélèvements qui influencent fortement la densité du stock) peuvent être approchés par une stratification géographique assez fine au niveau national. Le stock de bois dépend encore d'autres facteurs à des niveaux plus fins, comme les espèces forestières et le mode de gestion dans lequel elles sont conduites. Enfin, à conditions biologiques et écologiques données, la propriété foncière reste déterminante.

Les données d'inventaire forestier permettent de ventiler le stock de bois selon ces différentes caractéristiques de la forêt, et d'estimer une densité de stock de référence pour chaque contexte. C'est cette donnée d'inventaire qui peut être mise à profit pour une reconstitution de stock dans les statistiques anciennes.

Dans les statistiques anciennes utilisées, l'information systématiquement disponible comprend une ventilation des surfaces forestières par département, par propriété et par mode de gestion, **ces variables étant des facteurs qualitatifs croisés** (voir partie II – 2.2). Dans ce contexte, la méthode de reconstitution qui semble la plus légitime est une méthode d'imputation simple, conditionnelle au niveau de ces facteurs (Särndal, 1992). Concernant les espèces forestières, l'information sur les surfaces par essence disponible dans la statistique Daubrée a été utilisée (voir 3.3). Cette variable n'est pas croisée avec l'information de mode de gestion et une redistribution des surfaces feuillues et résineuses par mode de gestion a été effectuée.

Remarques importantes :

- 1) **dans un contexte non stationnaire, la donnée de référence pour les stocks doit également être questionnée, puisque la densité de stock augmente au cours du temps. Elle a justifié une analyse de sensibilité, déclinée (1) en périodes d'inventaire de référence, (2) en statistiques cible (moyenne ou gamme de quantiles).** Sous l'hypothèse d'une densification progressive de la forêt sur l'ensemble de la période d'étude, les quantiles inférieurs de la distribution du stock à l'hectare ont également été imputés (de 0,10 à 0,50 par classe de 0,05), ainsi que les quantiles de 0,55 et 0,60 permettant d'encadrer la moyenne.

- 2) **Tandis que l'information présente dans les statistiques anciennes correspond, à priori, à un mode de gestion objectif de la forêt, l'information collectée sur l'inventaire est une structure verticale physique. Si la présente analyse s'autorise par hypothèse de travail l'identification de ces catégories, elles peuvent être sources d'erreur.** Par exemple un taillis en conversion selon statistiques anciennes peut correspondre à un taillis, ou une futaie constatée en inventaire, ou encore des peuplements classés en taillis sous futaie (TSF) anciennement qui pourraient être classés en futaie irrégulière dans l'inventaire forestier.

Afin d'estimer le stock sur pied des forêts françaises au voisinage du début du XX^{ème} siècle, nous avons décidé d'utiliser une imputation conditionnelle associant à chaque strate de la forêt au début du siècle la moyenne du stock à l'hectare, observé dans les données de l'inventaire national, des forêts appartenant au même type de strate. **Les strates ont été définies en utilisant des combinaisons de critères de géographie (département), de gestion (propriété, structure) et de composition en essence.**

2.2 Données utilisées

Les reconstitutions se fondent sur l'estimation du volume de bois à l'hectare des forêts selon des stratifications des données de l'inventaire forestier (facteurs évoqués en 3.1), permettant l'imputation de ces estimations sur les surfaces stratifiées du début du siècle.

Deux périodes distinctes dans les données IFN (voir partie II – 2.1) ont été utilisées (**Figure 5.1**), permettant une analyse de sensibilité de l'effet de la période des données utilisées sur le résultat produit :

- Les premiers inventaires départementaux disponibles en base en ancienne méthode (AM ; année moyenne : 1983)
- Une moyenne des données nouvelle méthode (NM) entre 2006 et 2014 (année moyenne : 2010)

2 – Estimation du stock au voisinage du début du XX^{ème} siècle

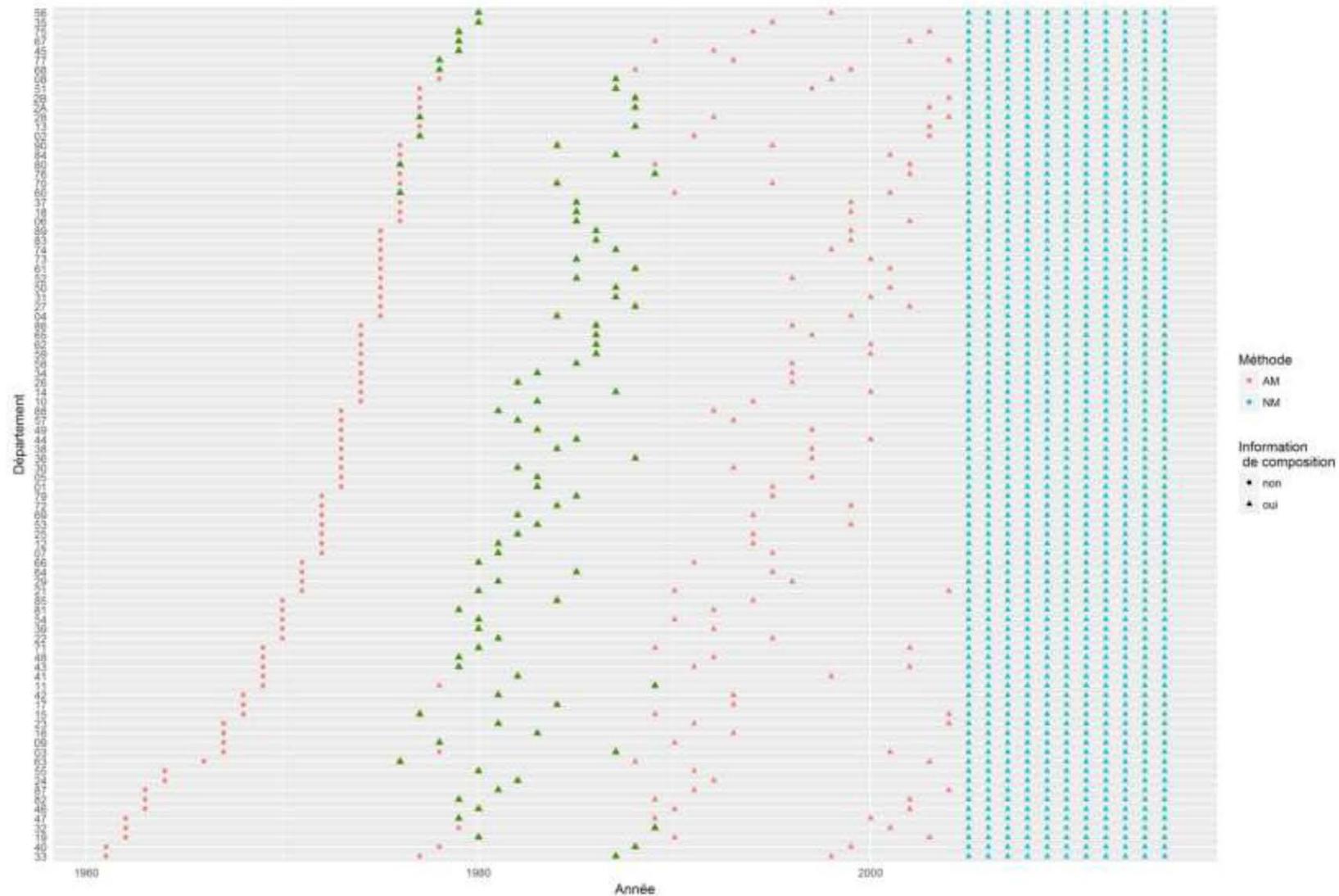


Figure 5.1. Inventaires IFN départementaux en fonction de l'année, de la méthode d'inventaire et de la disponibilité des données de composition en essence. En vert : données « ancienne méthode » utilisées.

2.3 Partition de la forêt française

2.3.1 Principes généraux

Les critères de partition prennent en compte les départements, la propriété, la structure et la composition en essence.

Les départements utilisés sont ceux identifiés par l'inventaire forestier. Les départements 2A et 2B sont regroupés en un seul département « Corse » pour correspondre aux données anciennes qui ne les distinguent pas.

La propriété a été considérée selon trois catégories (forêt domaniale, autres forêts publiques soumises, et forêt privée – qui inclut les forêts communales non soumises).

La structure est divisée en plusieurs catégories qui diffèrent d'une statistique à l'autre (voir partie II – 2.3). Une homogénéisation des données a été nécessaire et a permis de diviser cette donnée en trois catégories (futaie, TSF et taillis ; **Tableau 2.4**).

La composition en essence des peuplements n'a été étudiée que pour la statistique Daubrée. Une ventilation de la surface forestière par essence (15 essences étant explicitées) est disponible. Cependant, aucune information n'est disponible quant au protocole d'estimation de ces dernières surfaces, on peut considérer que l'essence indiquée correspond soit à une essence majoritaire (du point de vue soit du couvert soit de la surface terrière) soit à une essence objective (du point de vue de la gestion). Pour une meilleure homogénéisation avec les données IFN, correspondant à l'essence majoritaire, elle a été classée en deux catégories : feuillus et résineux, le regroupement des essences permettant de s'affranchir du problème de définition et ainsi permettre une meilleure homogénéisation. Les surfaces de composition « non identifiée » dans la statistique « Daubrée » ont été attribuées à part égale aux résineux et aux feuillus.

L'estimation d'un volume à l'hectare moyen a été effectuée au sein d'un système emboîté de partitions de la forêt française. Les différentes partitions sont explicitées dans le **Tableau 5.1**.

Partition	Département	Propriété	Structure	Composition
1	X			
2	X	X		
3	X		X	
4	X	X	X	
5	X	X		X
6	X	X	X	X

Tableau 5.1. Partitions de la forêt française utilisées pour l'estimation du stock à l'hectare moyen et de quantiles dans la gamme 0.1 – 0.6. En gris : les partitions utilisées seulement pour la reconstitution des stocks de la statistique Daubrée

2.3.2 Cas particuliers

Plusieurs difficultés particulières se sont posées, conduisant à faire entorse aux principes généraux exposés :

Statistiques de 1892 et 1908

- 1) Les données des statistiques de 1892 et 1908 ne couvrent pas l'Alsace-Moselle, alors annexée. Elles ont été complétées grâce aux données de la statistique allemande de 1908 (Ministerium Für Elsaß-Lothringen, 1909) pour la statistique Daubrée et les données de Hüffel (1920) pour la statistique agricole de 1892. Ces données ne sont cependant pas détaillées par mode de gestion. **Il n'a donc pas été possible de faire une estimation par type de structure pour ces trois départements et une estimation plus simple, par département ou département x propriété a été utilisée.**
- 2) La catégorie « périmètres décrétés » de la statistique de 1892 n'a pas été prise en compte dans nos calculs car ces surfaces, correspondent à la surfaces des périmètres décrétés des reboisements RTM. L'ensemble de ces périmètres ne sont pas nécessairement boisés et cette surface ne correspond qu'à une surface potentiellement boisée. De plus, ces reboisements ont commencé en 1860 et correspondent donc, pour une bonne partie, à des reboisements très récents.
- 3) Dans la statistique Daubrée, une catégorie « surface improductive » est identifiée. Ces surfaces correspondent à des surfaces sans volume forestier ou à très faible volume. Un stock nul leur a donc été imputé.
- 4) Les données de la statistique agricole de 1892 et de la statistique Daubrée présentent une catégorie de mode de gestion appelée « taillis en conversion ». La conversion, débutée au début du XIX^{ème} siècle (Schaeffer, 1949 ; Husson et Degron, 1999), est en cours à cette époque, et les peuplements ont une structure probablement plus proche de celle des taillis et des TSF que des futaies. Par hypothèse de travail, on a choisi d'attribuer les surfaces forestières correspondantes aux TSF. Un test de sensibilité relatif à ces affectations de surface dans les différents modes de gestion a été effectué sur les données de la statistique Daubrée (**Tableau 4.2**).
- 5) Les informations de structure et de composition en essences n'étaient pas croisées dans la statistique Daubrée. Il a donc été indispensable de les reconstituer. Pour cela, on a choisi d'affecter les surfaces des forêts résineuses de façon prioritaire au mode de gestion de la futaie, puis aux TSF, si la surface résineuse était plus importante que la surface des futaies, et enfin aux taillis si toute la surface résineuse n'était pas attribuée. Ce dernier cas n'a été rencontré que pour quatre couples département propriété (les

forêts privées des départements des Alpes-de-Haute-Provence, des Hautes-Alpes, des Bouches-du-Rhône et de la Drôme) et représente, au total, moins de 15 000 ha (*i.e.* < 0,15 % de la surface forestière totale).

Statistique de 1929

- 1) Les données de la statistique de 1929 ne permettent pas, au sein des forêts publiques soumises, de distinguer les forêts domaniales des autres forêts publiques. Seules deux catégories de propriété ont été utilisées pour ces données : forêt publique soumise au régime forestier (regroupant les forêts domaniales et les autres forêts publiques soumises, notamment communales) et forêt non soumise (correspondant essentiellement aux forêts privées) au régime forestier (**Tableau 2.3**).
- 2) La statistique de 1929 présente une modalité additionnelle de stratification des surfaces, correspondant à la forêt « récemment boisée ». Nous avons fait l'hypothèse de travail que ces jeunes forêts **ne présentaient qu'un très faible stock sur pied et étaient principalement composées de résineux (justifier cette dernière assertion avec ton chapitre introductif de thèse)**. Un stock à l'hectare égal au quantile 0.05 du stock à l'hectare des forêts résineuses de même strate (département x propriété x structure) leur a été imputé.

2.4 Méthode de reconstitution du stock

Le support des estimations est défini par un système de partitions de référence (voir 3.3, **Tableau 4.1**), formées de strates. Au sein de ces strates, on dispose de points de sondage d'inventaire.

Sur chaque point i d'inventaire d'une strate j , un volume à l'hectare (D_{ij}) a été estimé ainsi que la surface (S_{ij}) que représente le point. A partir de ces données, un volume à l'hectare moyen de la strate j ($D_{moy,j}$) a été calculé.

$$D_{moy,j} = \frac{\sum_{i \in j} D_{ij} \cdot S_{ij}}{\sum_{i \in j} S_{ij}} \quad (1)$$

De plus, les quantiles du stock à l'hectare de chaque strate, allant des niveaux 0,10 à 0,60, ont été calculés avec un pas de 0,05.

Dans le cas où une catégorie identifiée dans les statistiques anciennes n'a pas été inventoriée dans les inventaires forestiers nationaux, un stock à l'hectare nul lui a été attribué. Cependant, cela n'a été que très peu rencontré (**Annexe V.1**).

2.5 Intervalle de confiance du stock au début du siècle pour les imputations conditionnelles fondées sur la moyenne

En complément à l'estimation du stock par imputation conditionnelle (Vol_{ds}), on a cherché à en estimer l'erreur. Un intervalle de confiance (IC) a donc été calculé, qui a la forme suivante :

$$IC = [Vol_{ds} - q(0,975)\sqrt{V(Vol_{ds})}, Vol_{ds} + q(0,975)\sqrt{V(Vol_{ds})}] \quad (2)$$

Tout d'abord, la variance de la densité de stock dans la strate j (D_j) sous l'hypothèse d'indépendance entre les points i de sondage est donnée par :

$$V(D_j) = \frac{\sum_{i \in j} S_{ij} (D_{ij} - D_{moy,j})^2}{\sum_{i \in j} S_{ij}} \quad (3)$$

Avec $D_{moy,j}$, densité moyenne d'une strate j , estimée à partir des densité des points i qui composent cette strate (D_{ij}) et de leur surface (S_{ij}) :

$$D_{moy,j} = \frac{\sum_{i \in j} S_{ij} D_{ij}}{\sum_i S_{ij}} \quad (4)$$

Sous l'hypothèse d'indépendance entre les points de sondage, la variance de la densité de stock moyenne dans la strate j ($D_{moy,j}$, variance d'une moyenne) est donc calculée comme suit :

$$V(D_{moy,j}) = \frac{\sum_{i \in j} (S_{ij}^2 \cdot V(D_j))}{(\sum_{i \in j} S_{ij})^2} \quad (5)$$

Sachant que Vol_{ds} a été estimé à partir des surfaces des différentes strates étudiées au début du siècle ($S_{ds,j}$) et le volume à l'hectare moyen de ces strates dans les données inventaire ($D_{moy,j}$) :

$$Vol_{ds} = \sum_j (S_{ds,j} \cdot D_{moy,j}) \quad (6)$$

On a finalement :

$$V(Vol_{ds}) = \sum_j (S_{ds,j}^2 \cdot V(D_{moy,j})) \quad (7)$$

Les densités des différentes strates étant indépendantes, on obtient la variance de Vol_{ds} .

2.6 Résultats

2.6.1 Estimations du stock ancien fondées sur une imputation conditionnelle de la densité de stock moyenne

Les estimations (**Figure 5.2, Tableau 5.2**) révèlent en premier lieu que les estimations de stock sur les statistiques anciennes sont en deçà des estimations actuelles issues de l'inventaire forestier.

Partition	Stocks estimés (x 10 ⁶ m ³)					
	1892		1908		1929	
	AM	NM	AM	NM	AM	NM
1	1321	1611	1332	1618	1444	1749
2	1340	1622	1360	1637	1437	1725
3	1192	1348	1275	1460	1320	1480
4	1219 ± 11	1358 ± 17	1306 ± 10	1470 ± 16	1346 ± 8	1486 ± 15
5	NR	NR	1328	1682	NR	NR
6	NR	NR	1307	1481	NR	NR

Tableau 5.2. Estimations des stocks anciens (1892, 1908 et 1929) selon la partition et les données de l'inventaire forestier utilisées (premier inventaire disponible –AM- ou données de la nouvelle méthode - NM). Un intervalle de confiance a été calculé pour la partition par département, propriété et structure (4^{ème} partition). NR signifie « non renseigné »

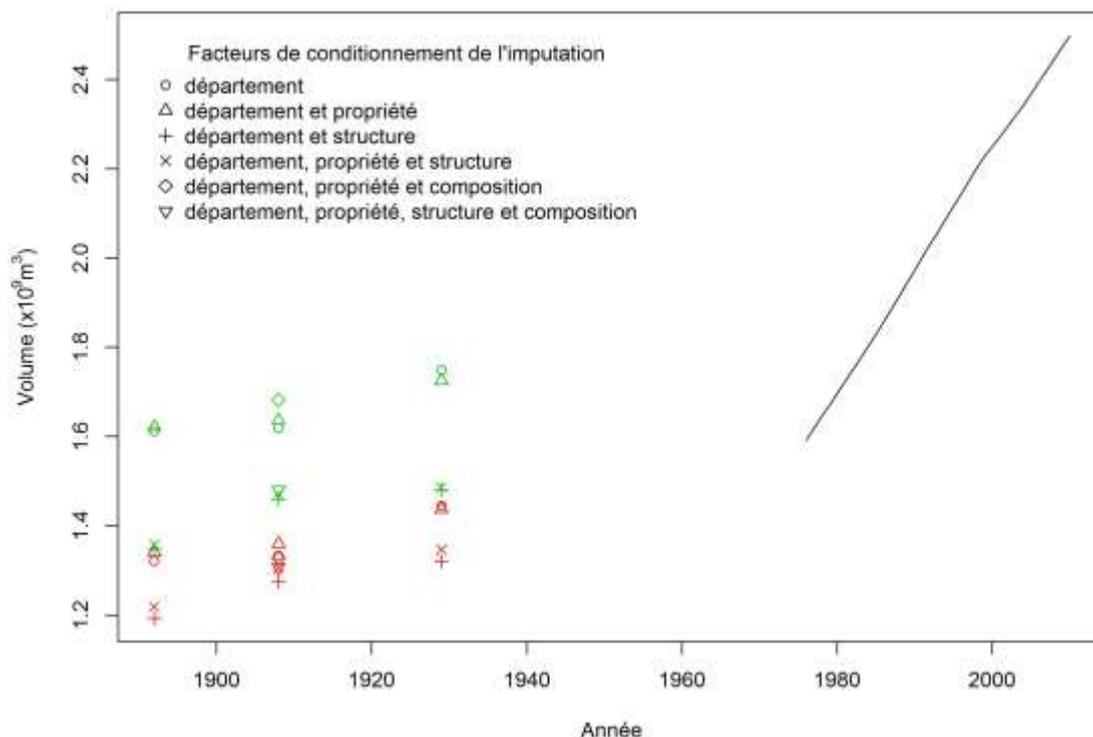


Figure 5.2. Estimation du stock total de bois (volume bois fort tige) en 1892, 1908 et 1929 selon les différentes partitions conditionnant l'estimation, et la période de référence pour les données d'inventaire forestier. En rouge : estimation effectuée à partir des données ancienne méthode de l'inventaire forestier. En vert : estimation effectuée à partir des données nouvelle méthode

On remarque une forte variation des résultats selon les données utilisées (AM ou NM ; Tableau 5.2 ; Figure 5.2). Les résultats provenant de l'imputation à partir des données AM sont plus faibles, retranscrivant bien la capitalisation importante du stock entre les deux périodes où les données ont été collectées (+39 m³/ha au niveau national). Cette capitalisation touche tous les types de structure (Figure 5.3). Pour la partition la plus fine (département x propriété et structure), cette différence en 1908 est de 165 millions de m³. Ce résultat nous pousse à utiliser les données AM, à priori plus proches des valeurs de la forêt au début du XX^{ème} siècle, plutôt que les NM pour localiser le stock.

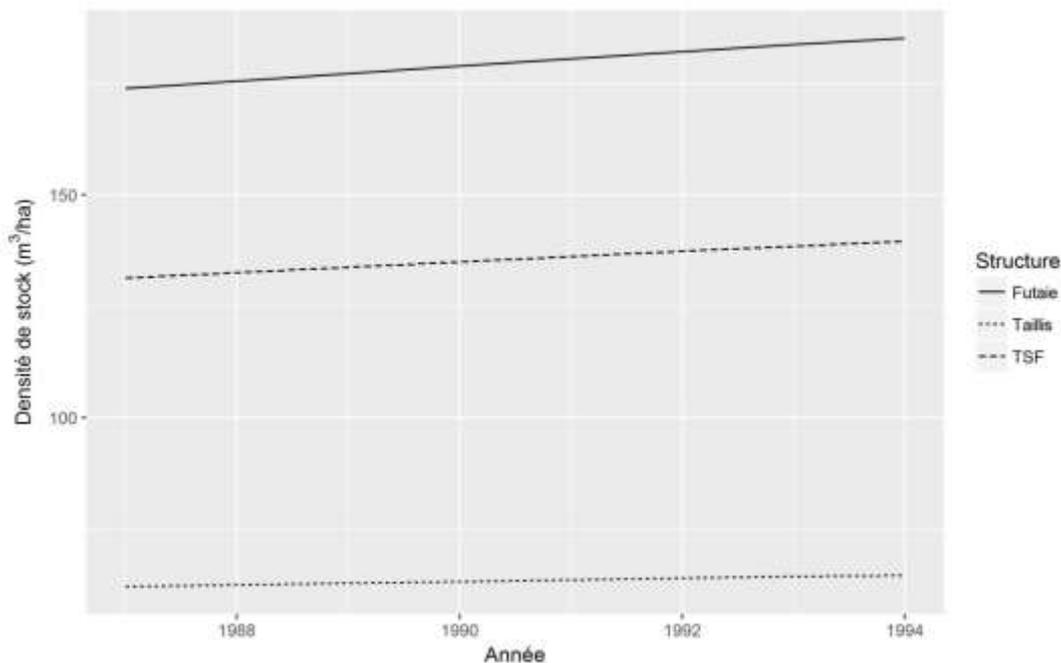


Figure 5.3. Evolution de la densité de stock entre 1987 et 2010 en fonction du type de structure

On observe ensuite une forte variation du volume calculé selon la partition utilisée (Figure 5.2 ; Tableau 5.2). En général, beaucoup d'estimations semblent élevées et incompatibles avec les estimations récentes de stock. En effet, pour 1908, la densité moyenne nationale de stock sur pied est comprise entre 130 et 171 m³/ha (*i.e.* un stock entre 1.28 et 1.68 millions de m³ ; Tableau 5.2), et serait donc supérieure à la densité moyenne en 1976 (121 m³/ha).

Les plus faibles estimations de stock, qui semblent être aussi les plus cohérentes avec les données d'inventaire récentes, sont obtenues avec les partitions prenant en compte la structure des peuplements, ce qui conforte le rôle majeur de cette variable comme variable de partition. Lorsque la structure est prise en compte, l'effet additionnel de la propriété forestière a un effet négligeable.

On observe encore une plus forte variation des estimations entre partitions lorsqu'elles s'appuient sur les densités de stock de référence issues de la NM, plutôt que de celles issues de l'AM. En NM, les estimations provenant d'une imputation prenant en compte la structure sont beaucoup plus faibles que les autres. Les forêts couvertes par l'AM ont une répartition des surfaces selon les structures forestières plus proche de celle des forêts anciennes que ne l'est celle des forêts de la NM (Tableau 5.3), expliquant ces fortes variations quand on prend en compte la structure en NM. Cette différence entre la structure ancienne et actuelle des forêts peut s'expliquer, par exemple, par la vague de conversion des TSF au XX^{ème} siècle

(Mather *et al.*, 1999 ; Degron, 1998 et 1999). De plus, tandis que la densité de stock a beaucoup augmenté en futaie (+36 m³/ha entre 1983 et 2010 ; +22% ; **Tableau 5.4**), la structure de taillis implique une densité de stock beaucoup plus stationnaire (+6 m³/ha ; +10%).

	1908	1983	2010
Taillis	25 %	18 %	12 %
TSF	41 %	33 %	31 %
Futaie	34 %	49 %	57 %

Tableau 5.3. Répartition des surfaces selon la structure forestière. Les données de 1908 proviennent de la statistique Daubrée, celles de 1983 du premier inventaire de l'inventaire forestier disponible en base et celles de 2010 d'une moyenne des inventaires forestiers entre 2006 et 2014.

	1983	2010	Augmentation relative
Taillis	60 m ³ /ha	66 m ³ /ha	+10%
TSF	127 m ³ /ha	148 m ³ /ha	+17%
Futaie	166 m ³ /ha	202 m ³ /ha	+22%

Tableau 5.4. Différences du stock à l'hectare des structures forestières entre 1983 (année moyenne du premier inventaire de l'inventaire forestier disponible en base) et 2010 (moyenne des inventaires forestiers entre 2006 et 2014)

Etonnamment, l'ajout de la prise en compte des compositions à la stratification par département x propriété x structure (qui ne concerne que la statistique forestière Daubrée) ne semble pas avoir un fort impact sur les résultats. Cela peut s'expliquer par le fait que la corrélation entre la part de la surface résineuse en AM et celle en 1908 à l'intérieur des strates définies par les départements, le type de propriété et la structure est forte (0,75 ; $p < 2,2 \cdot 10^{-16}$). De plus, la densité moyenne des futaies feuillues (191 m³/ha) est très proche de celle des futaies résineuses (214 m³/ha). La prise en compte des compositions quand les structures sont déjà définies n'a donc pas un impact significatif sur les résultats.

Quel que soit la partition utilisée, nos estimations semblent surestimées et l'évolution du stock sur la période ancienne (1892-1929) ne se retrouve pas dans une continuité logique de la chronologie de l'inventaire forestier et une rupture de pente singulière est observable.

On remarque également que les estimations en 1908 semblent élevées par rapport à celles de 1892 et 1929, entraînant une rupture de continuité. Cette surestimation possible a déjà été observée par Audinot (2016) lors de l'inter-comparaison de ces trois statistiques.

Les intervalles de confiance pour le stock total issu d'une imputation de la moyenne pour la partition par département x propriété x structure sont très serrés (**Figure 5.4 ; Tableau 4.2**) et montrent la faible imprécision des estimations de densité moyenne intra-strate à partir des données IFN.

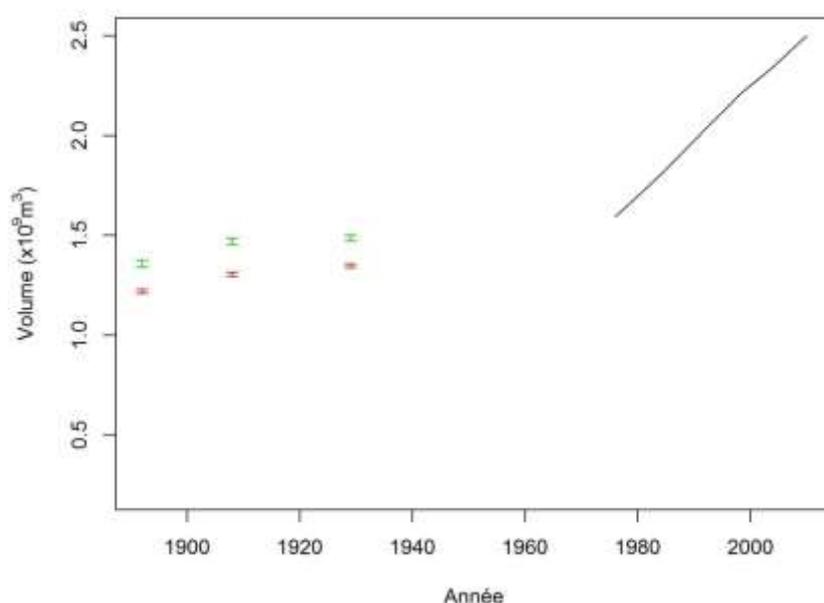


Figure 5.4. Intervalles de confiance pour le volume total estimé en 1892, 1908 et 1929 conditionnellement à la partition département x propriété et structure (moyenne du stock à l'hectare) et selon les périodes de référence pour les données d'inventaire utilisées. En rouge : estimation effectuée à partir des données ancienne méthode de l'inventaire forestier. En vert : estimation effectuée à partir des données nouvelle méthode

La structure ayant un effet important sur les estimations conditionnelles, l'attribution des surfaces des taillis en conversion aux TSF plutôt qu'à une autre classe de structure pourrait expliquer une surestimation de stock. Il a été décidé de tester l'effet d'un transfert des surfaces de « taillis en conversion » identifiées dans la statistique Daubrée dans les différentes structures (taillis, taillis-sous-futaie et futaie). Les résultats obtenus montrent un effet négligeable (**Tableau 5.5**). **Ce choix n'est donc pas à l'origine d'une surestimation du stock.**

Affectation des surfaces des taillis en conversion	Estimation du volume total en 1908 (x 10 ⁶ m ³)
Taillis	1 296
Taillis sous futaie	1 306
Futaie	1 312

Tableau 5.5. Estimation du stock en 1908 selon la structure attribuée aux taillis en conversion identifiés par la statistique Daubrée

2.6.2 Estimations du stock ancien fondées sur une imputation conditionnelle de quantiles de la densité de stock.

Les résultats précédents se fondent sur des données de référence pour la moyenne du volume à l'hectare des strates d'analyse des données IFN. **Cependant, même les estimations précédentes les plus précises semblent hautes relativement au niveau actuel du stock (Figure 5.2).**

La densité à l'hectare a augmenté entre 1976 et 2010 (passant de 121 m³/ha à 162 m³/ha ; partie III). Les forêts du XIX^{ème} siècle sont par ailleurs décrites comme appauvries dans la littérature (Mather *et al*, 1999 ; Husson et Degron, 1999 ; Degron, 1999) suite à une forte pression humaine sur la forêt française, entraînant une large déforestation. On peut donc supposer que la densité forestière à cette époque était faible et que celle-ci au début du XX^{ème} siècle n'était toujours pas aussi élevée que ce qu'elle peut l'être de nos jours. Il est donc vraisemblable que la densité de stock ait augmenté entre le début du siècle et la période contemporaine, et qu'elle entraîne une surestimation des estimations. **Des estimations de stock additionnelles fondées sur une imputation conditionnelle d'une gamme de quantiles de la densité du stock comprise entre 0,10 à 0,60 ont été effectuées, définissant un réseau d'estimations dans lesquelles la trajectoire historique réelle peut se situer (Figure 5.5 ; Tableau 5.6).** Il est à ce titre tout à fait possible que la trajectoire réelle ne passe pas au niveau du même quantile aux trois dates, traduisant un changement de densité des forêts (lié à une capitalisation ou décapitalisation) sur la période 1892-1929.

Il est à noter que, comme précédemment pour les moyennes, il est possible de calculer un intervalle de confiance autour de nos estimations à partir des quantiles, la loi d'échantillonnage des quantiles pouvant être précisée (Gallardo, 2007). Cela n'a pas été calculé dans le cadre de cette thèse.

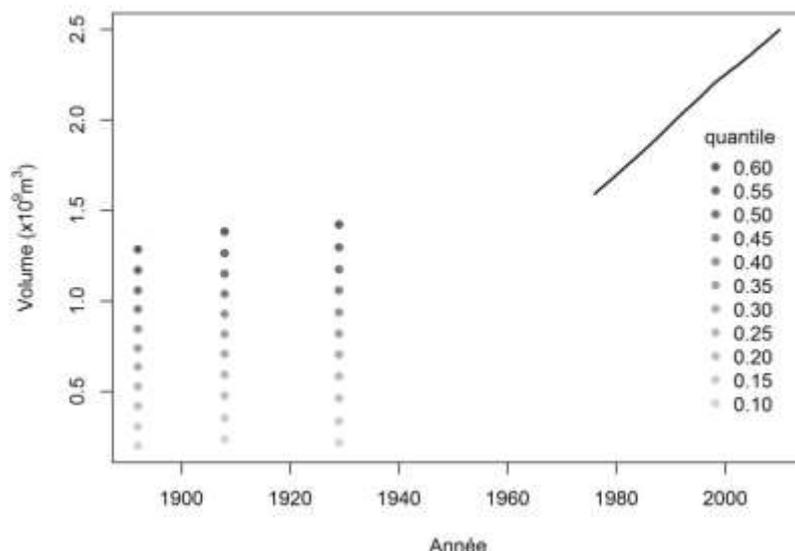


Figure 5.5. Estimations du stock total de bois en 1892, 1908 et 1929 à partir des imputations conditionnelles d’une gamme de quantiles allant de 0.10 à 0.60 discrétisée par pas de 0.05 des valeurs du stock à l’hectare au premier inventaire AM. La courbe noire représente la chronologie de l’évolution du volume forestier entre 1976 et 2010 d’après les données de l’inventaire forestier.

Quantile	Stock estimé (x 10 ⁶ m ³)			Densité de stock estimée (m ³ /ha)		
	1892	1908	1929	1892	1908	1929
0,10	199	234	217	20,3	22,6	20,3
0,15	304	352	334	31,1	34,1	31,3
0,20	417	475	461	42,6	46,0	43,2
0,25	526	592	583	53,7	57,3	54,6
0,30	635	706	702	64,9	68,3	65,8
0,35	739	817	819	75,5	79,1	76,8
0,40	845	927	937	86,3	89,7	87,8
0,45	953	1039	1057	97,4	100,5	99,1
0,50	1058	1149	1173	108,1	111,2	109,9
0,55	1169	1264	1296	119,5	122,3	121,5
0,60	1284	1382	1422	131,2	133,7	133,3

Tableau 5.6. Estimations des stocks et densités de stock anciens (1892, 1908 et 1929) selon le quantile utilisé

Les stocks estimés en 1929 semblent faibles par rapport à ceux de 1908 et doit être lié à la partition utilisée en 1929 qui ne prend en compte que deux types de propriétés (soumis/non soumis) au lieu de 3 pour les autres années (voir 3.3.2).

Les estimations qui, visuellement, semblent les plus plausibles sont celles effectuées à partir des quantiles de 0,20 à 0,40. De plus, il paraît plus plausible que la trajectoire réelle du stock passe par différents niveaux de quantiles pour les 3 années, traduisant une densification des forêts sur la période.

Galbert *et al.* (2015) estime le stock sur pied en 1908 à 900 millions de m³, ce qui correspond à notre estimation effectuée à partir du quantile de 0,40.

3 Reconstitution par simulation de l'évolution du stock sur pied depuis le début du XX^{ème} siècle

3.1 Principe de la reconstitution historique des stocks par simulation

La reconstitution par simulation de l'évolution du stock de bois sur un horizon séculaire a été opérée selon les principes suivants.

L'idée centrale repose sur : 1) l'utilisation (et la paramétrisation) d'un modèle de cinétique moyenne d'accumulation de stock net à l'hectare (toutes forêts confondues), 2) appliqué à une surface ancienne des forêts qui soit la plus proche possible du « minimum forestier » de la transition forestière (situé dans la première moitié du XIX^{ème} siècle, Mather *et al.*, 1999), et qui s'accroît progressivement selon la cinétique d'augmentation des surfaces, raisonnablement documentée depuis le XIX^{ème} siècle (Brénac, 1984), 3) avec une initialisation de la distribution du stock à cette date ancienne. Ce modèle phénoménologique ne représente donc pas les processus de la dynamique forestière (recrutement, croissance, mortalité et prélèvements tels qu'analysés dans le chapitre 2 de cette thèse). Il s'agit par ailleurs au plan technique d'un modèle reposant sur le principe d'une double somme : une première sommation de stock sur l'horizon de temps, conditionnelle à une surface initiale donnée, une seconde sommation sur les surfaces, qui augmentent progressivement.

Par minimisation approchée d'un critère d'erreur entre reconstitutions historiques de stock de bois et les simulations, on cherche à estimer les paramètres associés : 1) au modèle de cinétique d'accumulation de stock, 2) à l'initialisation de la distribution du stock à l'hectare, et qui permettent la simulation la plus proche des observations.

Par ailleurs, une analyse d'incertitude est conduite : 1) sur la forme du modèle de cinétique d'accumulation, 2) sur les quantiles de stock historiques à considérer pour la minimisation du critère, 3) sur certaines estimations historiques de surface, pour un double objectif : préciser au mieux la forme du modèle et sa paramétrisation, et préciser simultanément l'identification des quantiles de stock historiques estimés les plus plausibles, au sens de leur compatibilité à la simulation.

Bien que cela ait été initialement envisagé, nous n'avons donc pas considéré les modèles démographiques à grande échelle de la dynamique forestière (Wernsdörfer *et al.*, 2012), permettant l'explicitation des flux et de la structure diamétrique du stock, afin de commencer par une première étape simple, permettant de tester des hypothèses fondamentales.

3.2 Reconstitution de la dynamique historique des surfaces

3.2.1 Surfaces forestières avant l'inventaire forestier national (1961)

Dans un premier temps, une reconstitution la plus précise possible de l'évolution des surfaces forestières depuis la transition a été effectuée. Elle se base sur trois sources fondamentales : l'article de Brénac (1984), celui de Cinotti (1996), et sur nos estimations historiques issues des statistiques anciennes (qui contiennent par exemple des informations additionnelles, comme les surfaces de 1882 ou 1862 ; **Tableau 5.7**). Cette reconstitution est complétée par les données de l'inventaire forestier.

Les données anciennes (c'est-à-dire autres que celles de l'inventaire forestier national) sont constituées de :

- L'estimation de Young à partir d'une fraction (140/180) des cartes de Cassini. Brenac (1984) reprend cette estimation en y rajoutant une estimation de la surface boisée de la Corse et du Comté de Nice. L'estimation totale donne une surface forestière de 8 millions d'hectares. Cette estimation historique est considérée comme négativement biaisée,
- L'estimation de la surface forestière en 1830 par Cinotti (1996), **c'est-à-dire à une période voisine du minimum forestier supposé (Mather *et al.*, 1999)**. Celui-ci considère que cette surface était comprise entre 8,9 et 9,5 millions d'hectares. Nous avons donc choisi de la fixer à la moyenne, 9,2 millions d'hectares. Dans la même étude, cette surface est considérée comme inchangée entre 1788 et 1846. Il a donc été décidé de poser par hypothèse de travail **une estimation de la surface forestière qui est de 9,2 millions d'hectares en 1850**.
- L'enquête Mathieu de 1878 qui donne une surface forestière de 9 185 310 hectares hors Alsace-Moselle. Cette statistique a été corrigée de la surface forestière de l'Alsace-Moselle en y ajoutant une estimation (446000 ha) provenant d'une statistique forestière de l'Alsace-Lorraine (Hüffel, 1920). Au total, la surface forestière de 1878 a été estimée à 9660000 ha. Elle est réputée être biaisée négativement pour la forêt privée.
- Les données de statistiques agricoles (1862, 1892 et 1929). La statistique agricole de 1892, en plus de renseigner sur la surface forestière en 1892, apporte des informations

sur cette même surface en 1882. De la même façon que pour 1878, les données des statistiques de 1882 et 1892 ont été corrigées de 446 000 ha pour l'Alsace-Moselle.

- La statistique Daubrée qui donne une vision de la surface forestière en 1908. Cette statistique a été corrigée des données d'Alsace-Moselle, région annexée au début du XX^{ème} siècle, en utilisant les données d'une statistique allemande (Forststatistik, 1908).
- L'estimation de la surface forestière de 1956-59 par l'industrie papetière, effectuée « à dire d'expert » (Brénac, 1984), et considérée comme étant négativement biaisée

Bien que très utiles pour des reconstitutions sur le long terme, les statistiques anciennes ont l'inconvénient de ne pas présenter de définition explicite de la forêt.

Les données des statistiques agricoles de 1882 et 1892 donnent la taille des périmètres de reboisements RTM. Cependant, la totalité de ces surfaces n'est pas boisée. Elles ont donc été retranchées à la surface totale et une estimation de la surface boisée RTM à ces deux dates a été effectuée. En 1900, les boisements RTM, commencés en 1860, sont estimés à 88 000 ha (78 500 ha en 1897 selon Parde, 1998). Pour notre étude, il a été considéré que ces boisements ont été effectués de façon homogène dans le temps et les statistiques agricoles ont été corrigées de 44 000 ha en 1882 et 88 000 ha en 1892 amenant à une surface totale de 9 844 500 et 9 786 500 ha respectivement.

Date	Estimation (ha)	Source	Commentaire
1788	8000000	Estimation d'Arthur Young dans Brenac 1984	Initialement 7600000 ha corrigée de la Corse estimée à 400000 ha
1830	9200000	Cinotti 1996	
1850	9200000	Cinotti 1996	
1862	9320000	Statistique agricole de 1862	
1878	9660000	Enquête Mathieu dans Brenac 1984	9200000 ha + 446000 ha pour l'Alsace-Moselle (Hüffel, 1920) 945500 ha – 100000 ha de périmètres + 44000ha de boisements RTM + 446000 ha pour l'Alsace-Moselle (Hüffel, 1920)
1882	9844500	Statistique agricole de 1892	
1892	9786500	Statistique agricole de 1892	952000 ha – 266000 ha de périmètres + 88000 ha de boisements RTM + 446000 ha pour l'Alsace-Moselle (Hüffel, 1920)
1908	10334000	Statistique Daubrée de 1908	Corrigée de la ForstStatistik 1908 allemande
1929	10670000	Statistique agricole de 1929	
1958	11120000	Recensement provisoire dans Brenac 1984	

Tableau 5.7. Estimations des surfaces forestières françaises historiques depuis 1788

3.2.2 Surfaces forestières de la période couverte par l'inventaire forestier national

De la même manière que dans la partie III, les données des inventaires forestiers départementaux ont été agrégées par interpolation annuelle, en utilisant toutes les données AM disponibles et une moyenne des données de 2006 à 2014 pour la NM. Cette chronologie commence en 1976, date à laquelle 80% des départements avaient déjà eu un premier inventaire.

3.2.3 Adaptation et lissage de la chronologie des surfaces par ajustement d'un modèle de régression polynomial

Une courbe polynomiale a ensuite été ajustée par régression linéaire afin d'obtenir une trajectoire lissée et temporellement continue des surfaces. Des polynômes de différents degrés

ont été ajustés à la courbe en essayant de trouver le polynôme de plus faible degré s'ajustant le mieux possible aux données, et principalement aux données de l'inventaire forestier.

La série chronologique brute met en évidence la trajectoire accélérée de la surface forestière française. Il a été choisi de ne pas utiliser la donnée provenant de l'estimation de Young (1788) ni celle provenant du recensement de papèterie de 1958. Ces deux surfaces paraissent discutables, à la fois de par la littérature à leur sujet (Brenac, 1984 ; Vallauri *et al.*, 2012), et par le constat qu'elles ne rentrent pas dans une logique de continuité de l'évolution de la surface forestière française (**Figure 5.6**).

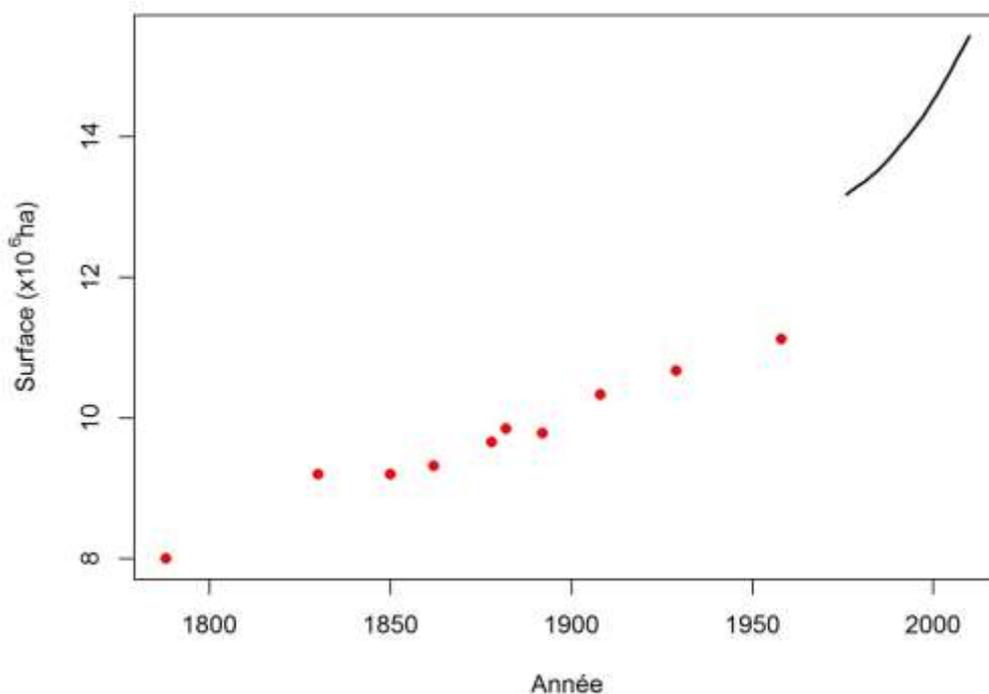


Figure 5.6. Chronologie brute de l'évolution de la surface forestière française entre 1788 et 2010 d'après des estimations anciennes (en rouge) et les données de l'inventaire forestier national (en noir).

La chronologie résultante (**Figure 5.6**) montre une forte accélération de l'augmentation des surfaces forestières depuis la mise en place de l'inventaire forestier. Cette accélération est peut-être due à une sous-estimation des surfaces forestières au début du XX^{ème} siècle, résultat d'une mauvaise estimation des surfaces forestières privées à cette époque. A titre d'analyse d'incertitude, un essai d'augmentation de ces surfaces de respectivement 500 000 et 1 000 000 ha a été effectué et montre une évolution qui semble alors plus continue lorsqu'elle est corrigée (**Figure 5.7**).

Nous avons donc décidé d'introduire une composante additionnelle à l'analyse de sensibilité associée à cet essai de simulation, en utilisant les données brutes et les données augmentées de 1 000 000 ha.

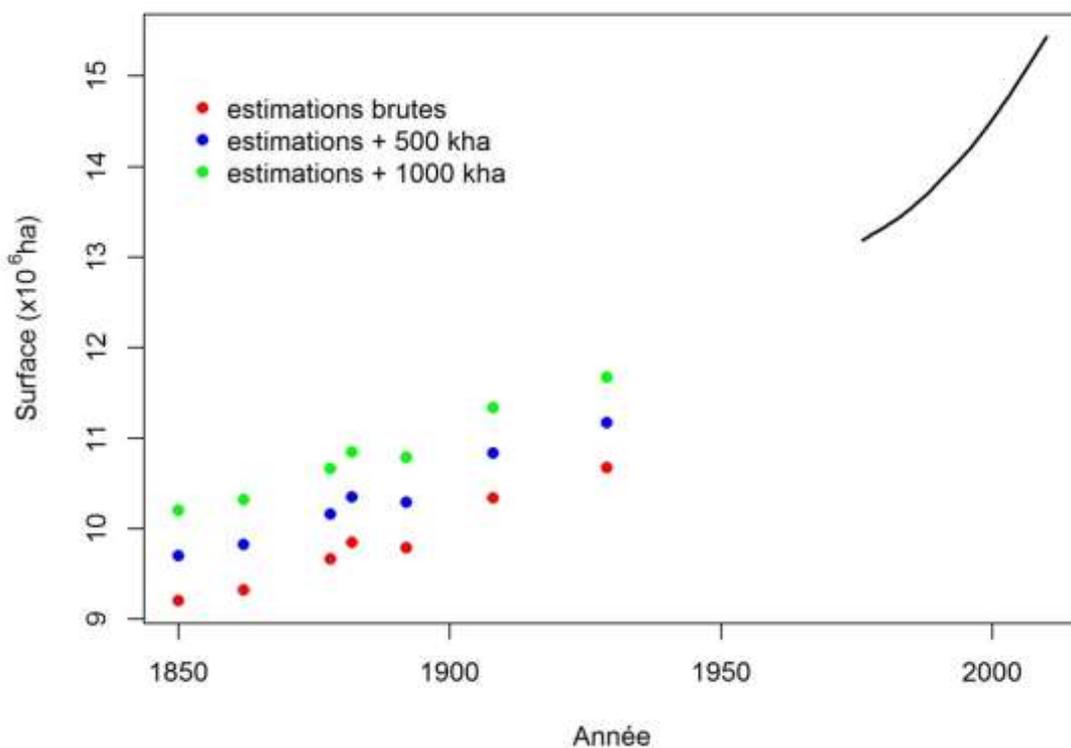


Figure 5.7. Chronologie de l'évolution de la surface forestière française entre 1850 et 2010 d'après les données de l'inventaire forestier national (en noir) et les données anciennes brutes (en rouge), ou augmentées de 500 (en bleu) ou 1 000 (en vert) kha

Pour les données brutes, un polynôme de degré 3 a été sélectionné (4 ; **Figure 5.8**) :

$$S(t) = 0,6328 t^3 - 3454,7 t^2 + 6.10^6 t - 4.10^9 \quad (8)$$

Pour les données corrigées de 1 000 kha, un polynôme de degré 4 (5 ; **Figure 5.9**) a été sélectionné :

$$S(t) = 0,0194 t^4 - 148,3 t^3 + 424648 t^2 - 5.10^8 t + 3.10^{11} \quad (9)$$

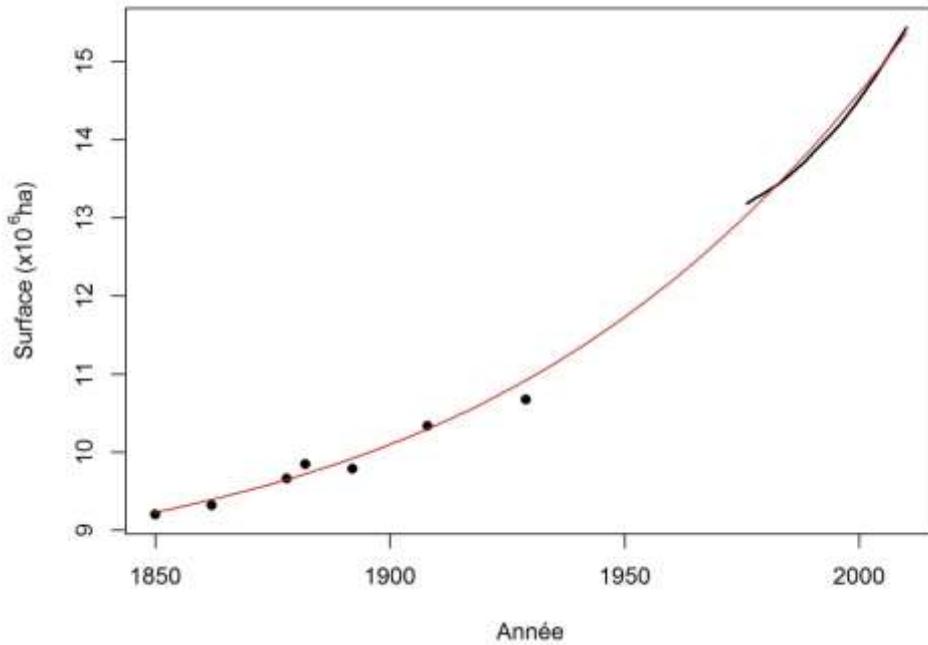


Figure 5.8. Lissage polynomial continu des surfaces forestières historiques brutes entre 1850 et 2010 (en rouge) et des estimations de la surface forestière française d'après l'inventaire (noir)

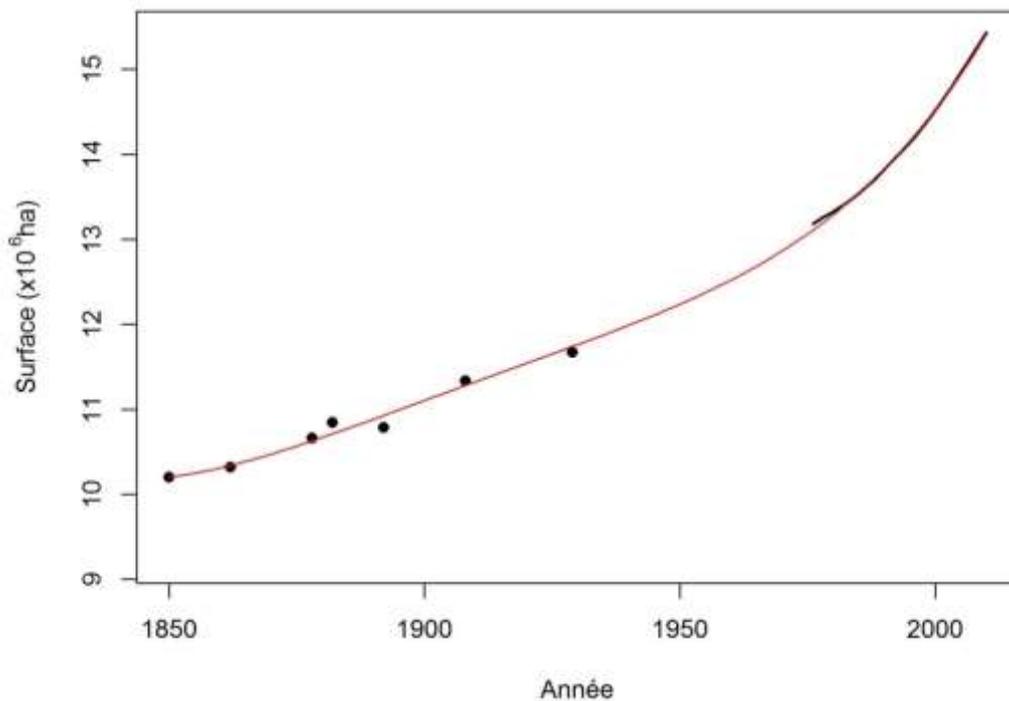


Figure 5.9. Lissage polynomial des surfaces entre 1850 et 2010 (en rouge) et valeurs des estimations de la surface forestière française (noir). Les surfaces avant la mise en place de l'inventaire forestier national ont été corrigées de 1000 kha

3.3 Modélisation de l'évolution du volume forestier depuis 1850

La reconstitution de l'évolution du stock sur pied de la forêt française se base sur l'utilisation d'un modèle prenant en compte l'évolution des surfaces et la densification du stock de bois moyen des forêts au cours du temps. Plusieurs modèles ont été mis en place et les résultats ont été comparés aux données IFN et aux estimations des stocks anciens.

3.3.1 Présentation du modèle

Le modèle mis en place est un **modèle discret**, permettant une facilité de calcul, qui prend en compte une forêt initiale de surface S_0 et de densité D_0 , et que l'on initialise en 1850.

Par la reconstitution historique de la surface forestière, on a chaque année une estimation de la surface des nouvelles forêts (S_{new}) tandis que les surfaces préexistantes accumulent du stock de bois.

Différents modèles de cinétique d'accumulation de stock net, reliant la densité de stock de bois à l'âge des surfaces forestières ont été testés.

L'hypothèse de travail de départ a été que le stock net de bois à l'hectare s'accumule selon une fonction concave saturante (Pretzsch, 2009), selon une observation classique en forêt gérée. Néanmoins, des simulations exploratoires, confrontées aux observations historiques, nous ont progressivement amené à considérer des hypothèses alternatives a priori moins réalistes, associées à une accumulation accélérée de stock.

Finalement, trois fonctions d'accumulation de comportement très contrasté ont été considérées : une fonction concave saturante à deux paramètres, avec le modèle monomoléculaire (ou de « Mitscherlich » ; Zeide, 1993 ; Franc *et al.*, 2000) reposant sur une fonction exponentielle négative (**Figure 5.10**), un modèle simplement linéaire à un seul paramètre de pente, (**Figure 5.11**) et un modèle sigmoïde saturant, à asymptote horizontale. Le choix de ce modèle résulte d'une double logique : 1) s'autoriser des cinétiques d'accumulation convexes, dans le contexte de nos essais exploratoires, 2) tout en bornant le phénomène d'accumulation de stock, pour que les simulations restent vraisemblables. Le modèle de Hossfeld à 3 paramètres a été choisi comme modèle sigmoïde (**Figure 5.12**). Il en existe de nombreux (Zeide ; 1993) mais plusieurs d'entre eux présentent le défaut d'un démarrage trop lent (demi-tangente horizontale, parmi lesquels les modèles de Chapman-Richards ou de Korf/Lundquist-Matérn), et ce modèle est à ce titre plus réaliste sur son démarrage au temps initial (Bontemps *et al.* 2009).

3.3.2 Modèles d'accumulation de stock net et paramétrisations associées

3.3.2.1 Modèle monomoléculaire

Le modèle monomoléculaire traduit une densification plus rapide des jeunes surfaces forestières, et présente une asymptote représentant une densité maximale (D_{max}) des peuplements, plausible sous l'hypothèse classique d'auto-éclaircie des peuplements (Skovsgaard et Vanclay, 2008). Sa paramétrisation initiale repose sur un paramètre de forme et un paramètre d'asymptote :

$$D(\hat{age}) = D_{max} \left(1 - \frac{1}{e^{c \cdot \hat{age}}} \right) \quad (10)$$

En posant t_{max} , l'âge auquel le peuplement atteint 99% de la densité maximale, on obtient une estimation de la constante c :

$$c = -\frac{\ln(1-99\%)}{t_{max}} \quad (11)$$

Le modèle peut donc être reparamétré selon une densité maximale et une constante de temps: D_{max} et t_{max} .

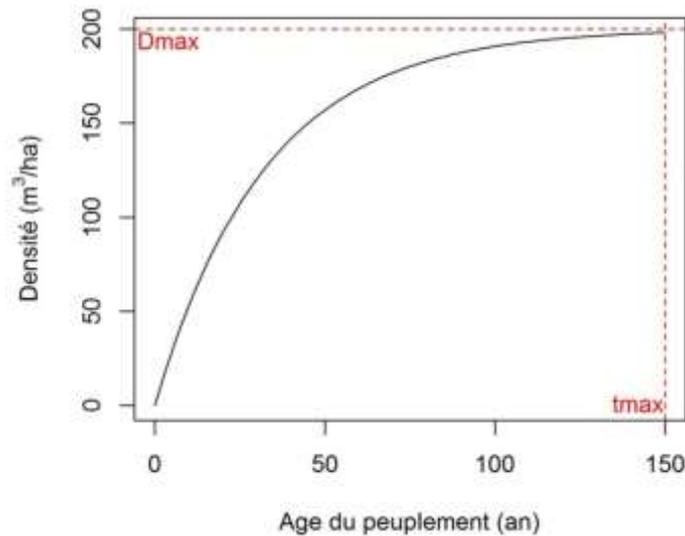


Figure 5.10. Densité de stock de bois d'une surface forestière en fonction de son âge estimé par le modèle mononucléaire avec une densité maximale (D_{max}) de 200 m³/ha et un âge auquel le peuplement atteint 99% de la densité maximale (t_{max}) de 150 ans.

3.3.2.2 Modèle linéaire

Le modèle linéaire est le modèle le plus simple. Avec un tel modèle, on postule que l'expansion des forêts se fait de façon constante et illimitée, quel que soit l'âge des surfaces forestières :

$$D(\hat{age}) = \frac{D_{max}}{t_{max}} \cdot \hat{age} \quad (12)$$

Avec D_{max} (m^3/ha) la densité maximale et t_{max} le temps pour atteindre cette densité. Le rapport entre D_{max} et t_{max} constitue la pente du modèle linéaire.

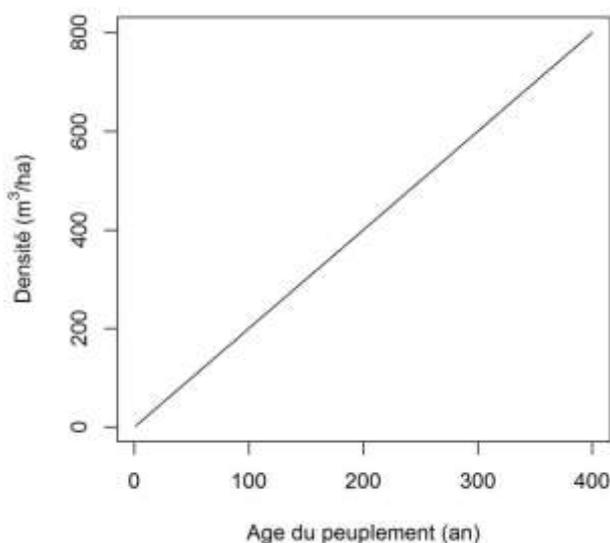


Figure 5.11. Densité du peuplement en fonction de son âge estimé par le modèle linéaire avec une pente de 2

3.3.2.3 Modèle de Hossfeld

Enfin, le modèle de Hossfeld (Zeide 1993, Franc *et al.*, 2000) présente à la fois une densification lente des jeunes surfaces qui va en s'accroissant, un point d'inflexion au-delà duquel l'accumulation de stock ralentit, et une densité maximale finale. Ce modèle est originellement utilisé pour modéliser la croissance en hauteur des arbres ou d'un peuplement (Elfving, 1997) :

$$\frac{dx}{dt} = rx^{1-m} \left(1 - \frac{x}{K}\right)^{1+m} \quad (13)$$

Il peut être reparamétrisé explicitement par rapport aux quantités cibles qui nous intéressent :

$$D(t) = \frac{D_{max}}{D_{max} \left[\left(\left(\frac{D_{max} - D_{inf}}{D_{max} D_{inf}} \right)^{\frac{2D_{inf} - D_{max}}{D_{max}}} - C \right) \frac{t}{t_{Dinf}} + C \right]^{\frac{D_{max}}{2D_{inf} - D_{max}}} + 1} \quad (14)$$

Où D_{max} (m³/ha) est la densité maximale, D_{inf} (m³/ha) la densité de la forêt au niveau du point d'inflexion, t_{Dinf} , le temps que met une surface forestière avant d'atteindre ce point d'inflexion et C qui dépend de D_{ini} (m³/ha) la densité initiale (qui est celle d'une jeune forêt nouvellement installée) :

$$C = \left(\frac{1}{D_{ini}} - \frac{1}{D_{max}} \right) \left(\frac{2D_{inf}}{D_{max}} - 1 \right) \quad (15)$$

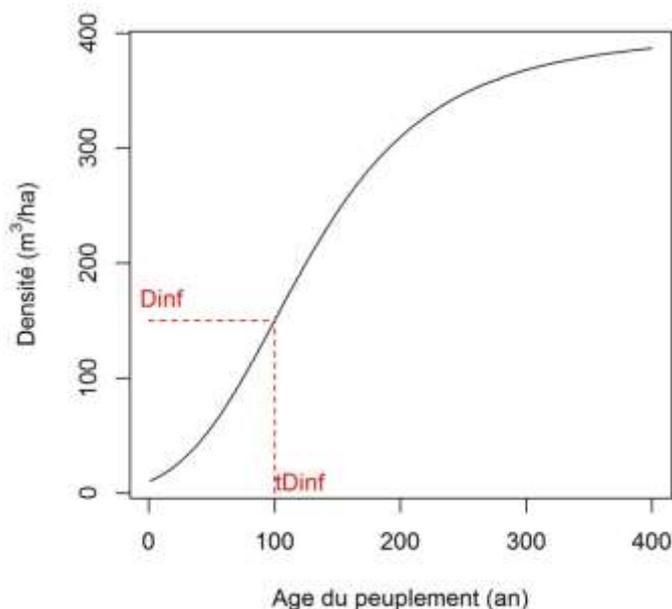


Figure 5.12. Densité de stock de bois d'une surface forestière en fonction de son âge, simulée par le modèle de Hossfeld avec une densité maximale de 400 m³/ha, une densité au point d'inflexion de 150 m³/ha (Dinf), un âge au point d'inflexion de 100 ans (tDinf) et une densité initiale de 10 m³/ha.

3.3.2.4 Ajustement des paramètres des modèles

Des gammes de valeurs larges des paramètres des différents modèles ont été testées et les résultats des simulations ont été comparés aux volumes de l'inventaire forestier (1976, 1986, 1996 et 2010) et aux volumes anciens estimés (1892, 1908 et 1929). Les valeurs attribuées aux différents paramètres sont présentées dans le **Tableau 5.8**.

Modèle	Paramètre	Valeurs attribuées
Monomoléculaire	D_{\max}	De 100 à 300 m ³ /ha avec un pas de 50 m ³ /ha
	t_{\max}	De 100 à 250 ans avec un pas de 50 ans
Linéaire	D_{\max}	De 100 à 300 m ³ /ha avec un pas de 50 m ³ /ha
	t_{\max}	De 100 à 250 ans avec un pas de 50 ans
De Hossfeld	D_{\max}	De 300 à 500 m ³ /ha avec un pas de 100 m ³ /ha
	D_{ini}	2,5, 5 ou 10 m ³ /ha
	D_{inf}	De 51 à 201 m ³ /ha avec un pas de 50 m ³ /ha
	$t_{D_{\text{inf}}}$	De 50 à 250 ans avec un pas de 50 ans

Tableau 5.8. Valeurs prises par les différents paramètres. Dans le cadre de notre étude, une autre paramétrisation du modèle de Hossfeld a été utilisée dans un premier temps (Annexe V.2), ne nous permettant pas d'utiliser des chiffres ronds pour les valeurs de D_{inf} .

3.3.3 Conditions initiales et analyse de sensibilité

La surface initiale des forêts françaises correspond à la surface en 1850 obtenue grâce aux courbes empiriques (avec et sans augmentations de 1000 kha). Deux valeurs possibles ont donc été utilisées (**Figures 5.8 et 5.9**).

Des estimations sur la densité initiale de la forêt française en 1850 ont été effectuées. La densité en stock des forêts françaises a augmenté entre 1976 et 2010 (chapitre II) passant de 121 à 162 m³/ha en moyenne. De plus, dans la littérature (Mather, 1999), une diminution forte et inquiétante de la ressource en bois au début du XIX^{ème} siècle est décrite, la densité devait donc être encore plus faible à cette époque qu'en 1908. La reconstitution du stock au début du siècle permet d'estimer ce stock à moins de 1,3 milliards de mètres cubes pour une surface de 10 millions d'hectares. Ce qui donne une densité moyenne de moins de 126 m³/ha. **La densité initiale de notre étude a donc été choisie pour être inférieure à cette densité. Une analyse de sensibilité sur la densité initiale a été effectuée en utilisant trois valeurs moyennes : 25, 50 et 100 m³/ha.**

Cette densité initiale de stock de bois a été complétée de la **structure en âge des surfaces forestières de 1850**. Deux alternatives ont alors été considérées :

- la forêt initiale est considérée comme homogène, avec un seul âge qui est calculé pour toute la forêt, à partir du modèle d'accumulation de stock postulé.
- la forêt initiale est hétérogène et est séparée en cinq classes de densité de stock (et donc d'âges) différentes, et présentant une **distribution classique asymétrique en J**. La part de la surface attribuée à ces forêts est de 50, 20, 15, 10 et 5% de la surface

totale pour les cinq classes de densité de stock (D1, D2, D3, D4 et D5 respectivement ; **Tableau 5.9**) dans l'ordre de densité croissante.

D0 (m ³ /ha)	Densité des groupes composant la forêt (m ³ /ha)				
	D1	D2	D3	D4	D5
25	12,5	25	37,5	50	62,5
50	25	50	75	100	125
100	50	100	150	200	250

Tableau 5.9. Densité de stock des cinq classes de densité (D1, D2, D3, D4 et D5) composant la surface forestière en 1850 en fonction de la densité initiale (D0)

3.3.4 Mesure de la contribution à l'évolution en stock des forêts d'origine

Grâce au modèle, il a été possible de séparer la contribution des « nouvelles forêts » (présentes depuis 1850, au moins) de celle des anciennes (qui se sont établies après 1850) au stock de bois dans la forêt au cours du temps, afin d'explorer leur part respective potentielle dans l'expansion totale.

3.4 Résultats des simulations

3.4.1 Sélection du modèle

Modèle monomoléculaire

Les simulations conduites avec le modèle monomoléculaire montrent que ce modèle ne permet pas de reconstituer la dynamique passée des forêts, à aucune condition sur des gammes de valeurs larges des deux paramètres D_{max} et t_{max} (**Figure 5.13**). En effet, il ne permet pas de retrouver simultanément ni le même niveau ni la même pente que celle observée dans les données IFN. De plus, l'évolution du stock est beaucoup trop rapide au début du siècle, entraînant une très forte surestimation du stock. On peut aussi remarquer une densité à l'hectare qui diminue dans la période actuelle, ce qui ne correspond pas aux observations de l'IFN.

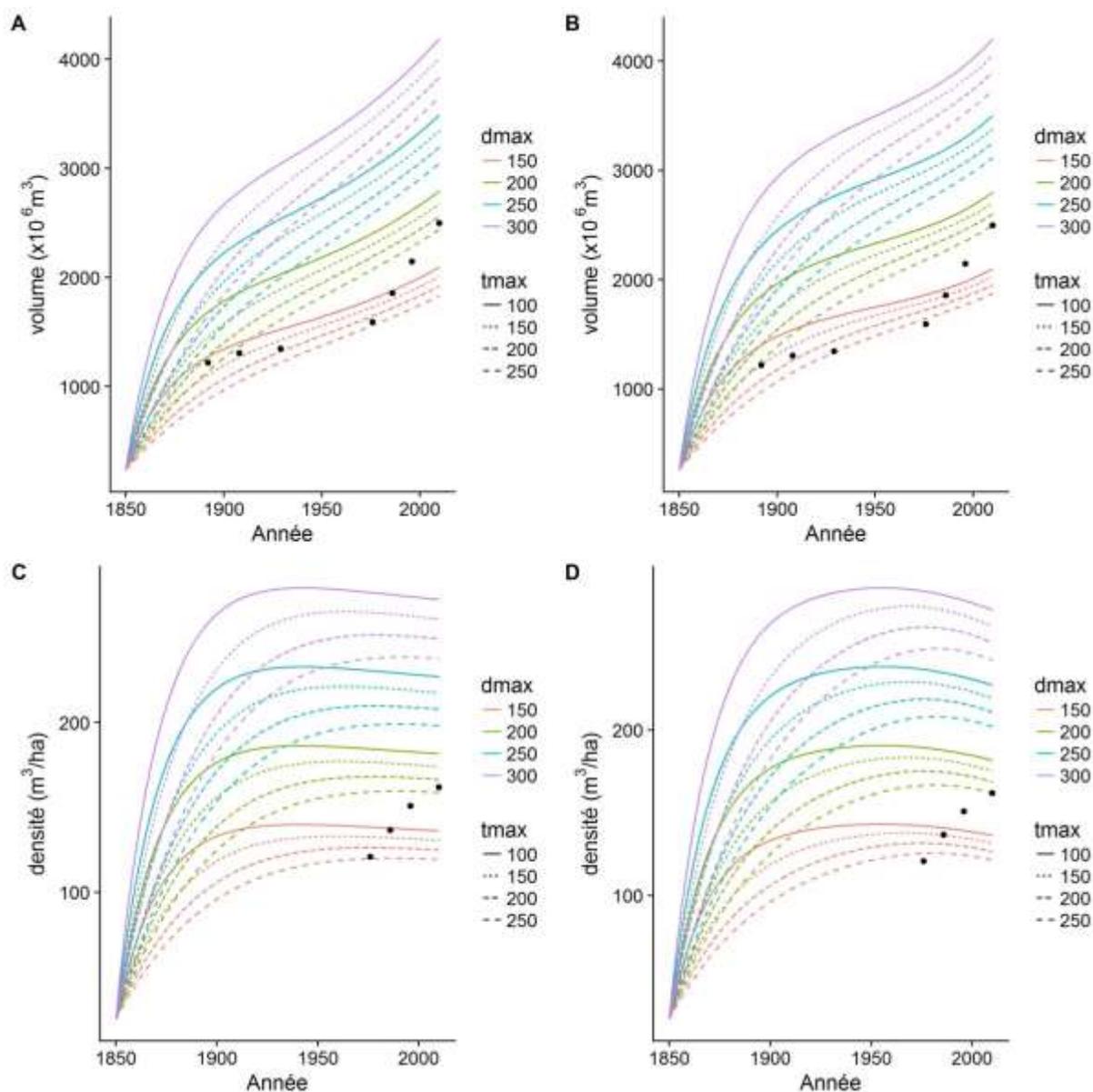


Figure 5.13. Simulations de volume et de volume par hectare avec le modèle monomoléculaire pour des surfaces forestières brutes (A, C) ou modifiées (+ 1000 kha pour les surfaces anciennes ; B, D) et un état initial hétérogène avec une densité initiale moyenne de 25 m³/ha. dmax correspond à la valeur de la densité à l'asymptote (D_{max}) et tmax le temps qu'il faut pour atteindre 99% de dmax (t_{max}).

Modèle linéaire

Le modèle linéaire, qui repose sur une hypothèse d'accumulation constante et illimitée du stock à l'hectare, permet, à certaines conditions de valeur de la pente, de retrouver le niveau d'augmentation des stocks observé depuis 1976 ainsi que la tendance d'évolution des densités de stock (**Figure 5.14**), mais surestime fortement le rythme de cette accumulation au début du

siècle. De plus, ce modèle montre une évolution absolue trop rapide du stock et entraîne, lui aussi, une surestimation forte du stock sur pied.

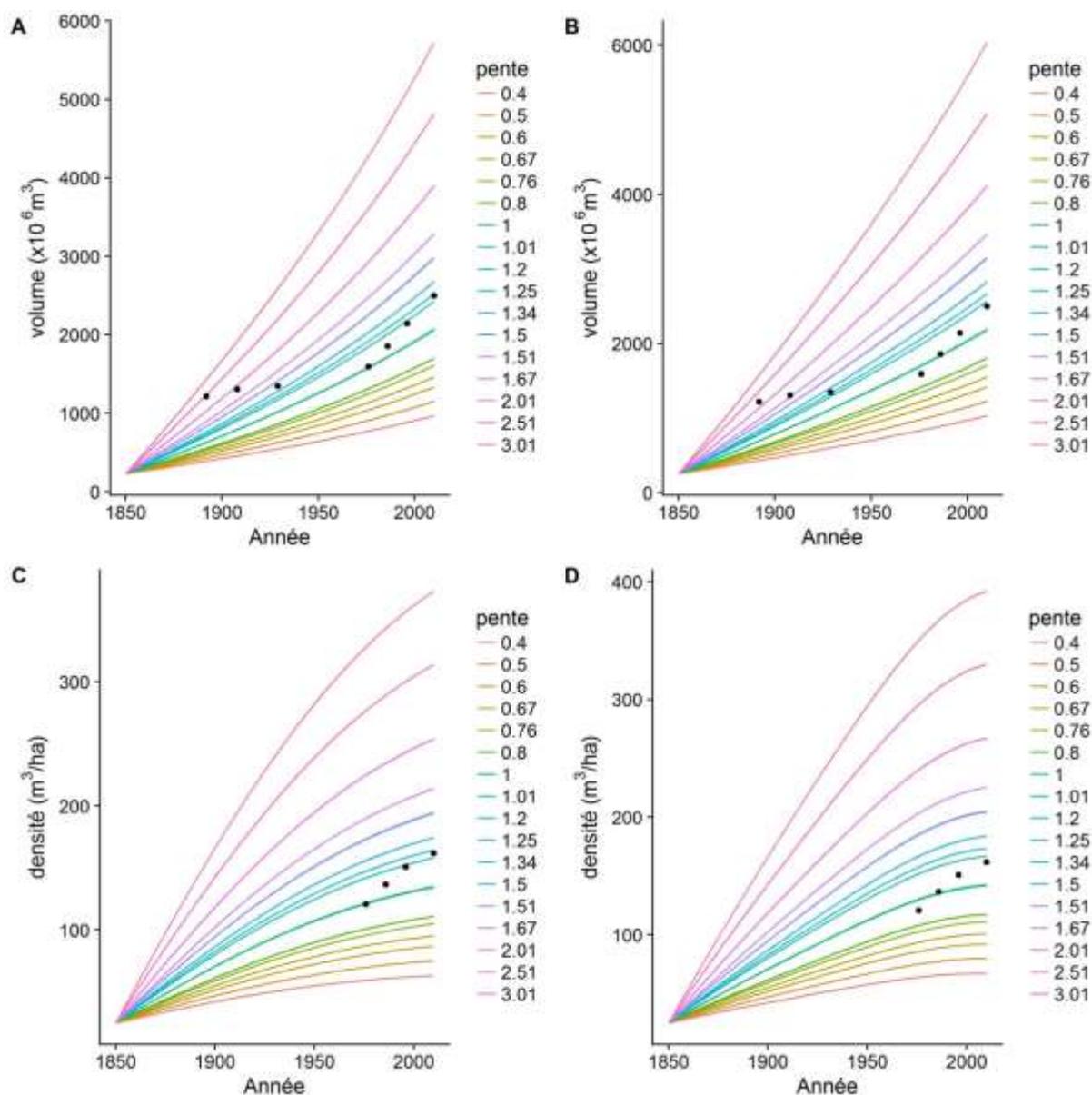


Figure 5.14. Simulations de volume et de volume par hectare des modèles pour une surface brutes (A, C) ou modifiées (+ 1000 kha pour les surfaces anciennes ; B, D), une densité qui suit une loi linéaire et un état initial hétérogène avec une densité initiale moyenne de 25 m³/ha

Modèle sigmoïde

Les simulations avec le modèle de Hossfeld présentent en partie des trajectoires accélérées, compatibles avec les estimations historiques de stock. Ce modèle permet de retrouver la tendance accélérée de l'évolution du stock et celle décélérée de l'évolution de la densité (Figure 5.15). Cela est en particulier vrai pour des temps au point d'inflexion qui atteignent les 150 ans, c'est-à-dire pour une accumulation essentiellement accélérée du stock net sur une durée très longue. **Cependant, et à nouveau il n'est pas possible de trouver une trajectoire proche de l'ensemble des observations sur l'espace des paramètres. Ces trajectoires simulées suggèrent que l'estimation des stocks fondée sur une imputation de la moyenne de densité de stock est élevée.**

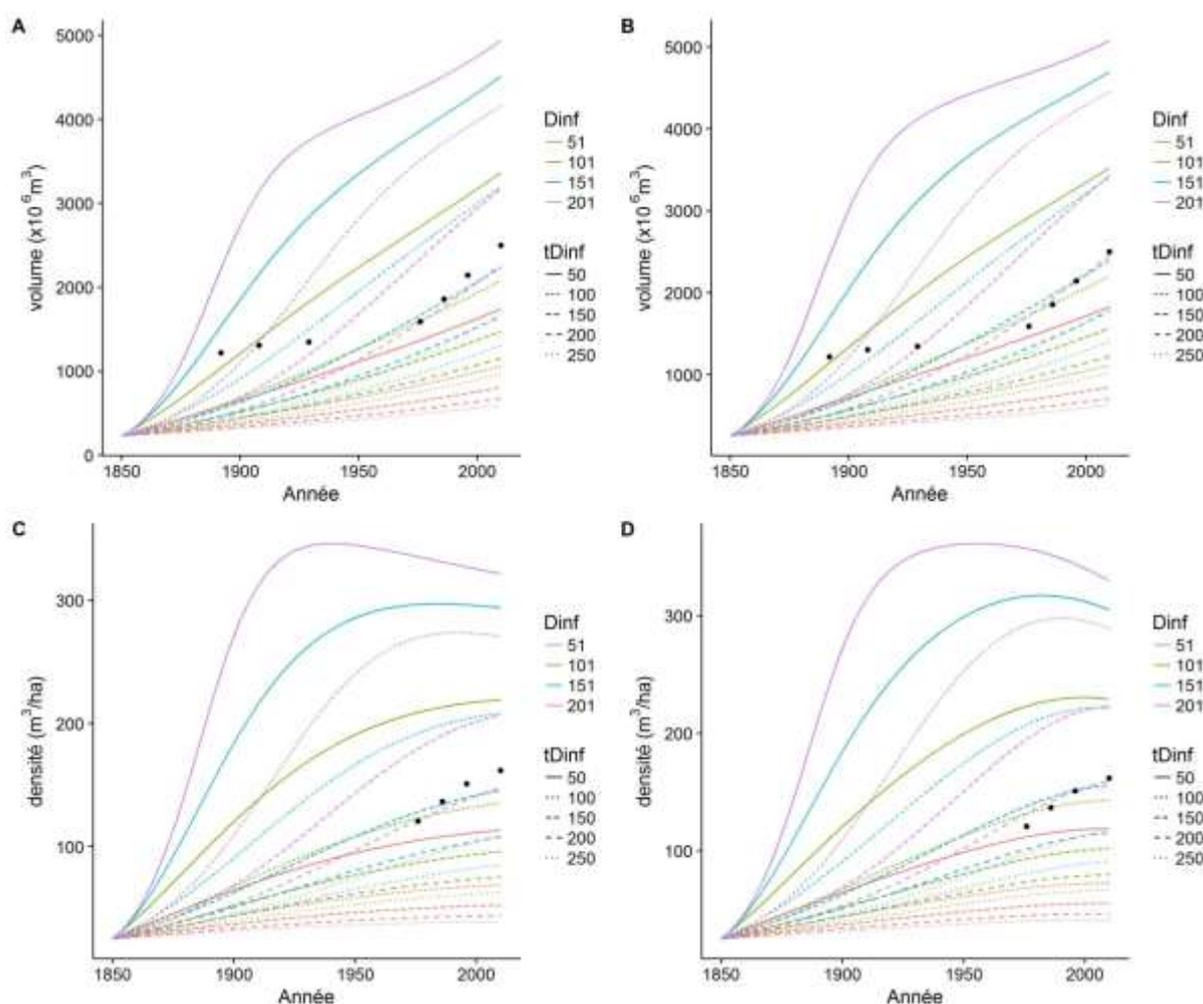


Figure 5.15. Simulations de volume et de volume par hectare des modèles pour une surface brutes (A, C) ou modifiées (+ 1000 kha pour les surfaces anciennes ; B, D), une accumulation de stock à l'ha qui suit une loi de Hossfeld de densité à l'origine de 10 m³/ha et un état initial homogène avec une densité initiale moyenne de 25 m³/ha. Dinf correspond à la densité au point d'inflexion et tDinf l'âge au point d'inflexion.

3.4.2 Co-estimation des paramètres du modèle d'évolution du stock et des valeurs quantiles de stocks historiques de bois (modèle de Hossfeld).

Afin d'identifier les paramétrisations du modèle de Hossfeld qui représentent le mieux l'évolution du stock observé, l'erreur de prédiction (RMSEP : Root Mean Square Error of Prediction) a été calculée pour chaque simulation entre les simulations et le stock observé par l'IFN (stock réel) en 1976, 1986, 1996 et 2010 ainsi que les stocks calculés par moyenne ou à partir des quantiles de 0,10 à 0,60 en 1892, 1908 et 1929. Seule la distribution classique asymétrique du stock à l'hectare initial a été étudiée ici :

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum_{nt}(V_{sim}(t)-V_{obs}(t))^2}{nt}} \quad (16)$$

Où $V_{sim}(t)$ correspond au volume simulé à la date t et $V_{obs}(t)$ le volume relevé par l'inventaire forestier en 1976, 1986, 1996 et 2010 ainsi que les volumes « reconstitués » du début du siècle et nt le nombre de points de comparaisons (ici : 7).

La densité moyenne de la forêt pouvant avoir changé entre les inventaires anciens, toutes les combinaisons possibles de quantiles et de moyennes ont été testées.

Ainsi, l'ensemble de paramètres et des conditions initiales qui conduisent aux simulations les plus proches de l'évolution du volume forestier total (*i.e.* celui qui minimise la RMSEP), a été sélectionné.

Les dix ensembles de paramètre présentant les plus faibles RMSEP sont détaillés dans le **Tableau 5.10**.

Plusieurs enseignements s'en dégagent :

- 1) De façon très générale, la proximité forte entre les meilleures paramétrisations suggère une robustesse du modèle, qui a été voulu extrêmement simple, permettant d'exclure a priori l'existence de minima locaux,
- 2) le temps d'arrivée au point d'inflexion est important (entre 150 et 250), et le plus élevé pour les meilleures simulations. **Depuis 1850, on se trouve donc dans une phase où la capitalisation de l'unité surfacique de forêt se ferait essentiellement selon une trajectoire accélérée,**
- 3) La densité au point d'inflexion, couramment entre 150 et 200 m³/ha, est élevée, et correspond à **l'ordre de grandeur des niveaux de densité observés couramment dans la forêt française aujourd'hui.**
- 4) la densité maximale est autour de 400-500 m³/ha et est donc élevée. A titre de comparaison, aucun pays en Europe ne montre une densité de stock supérieure à

320 m³/ha (Forest Europe, 2015). Toutefois, cette estimation est très modèle-dépendante, et l'absence de données pour étayer la valeur de ce paramètre conduit à ne pas s'y attarder,

- 5) Au plan des éléments entrant dans l'analyse d'incertitude associée à ce modèle, il ressort : a) que c'est **la densité initiale de stock de la forêt la plus faible (25 m³/ha) qui conduit à l'erreur la plus faible**, suggérant une extrême faiblesse du stock en 1850, b) **que c'est le scénario de surface systématiquement augmenté de 1 Mha aux dates anciennes qui fournit les meilleures simulations**, confirmant qu'un biais négatif dans ces statistiques est plausible (voir section 4.2.3 et **Figures 5.8 et 5.9**).
- 6) enfin, au plan des estimations conditionnelles des stocks historiques, les meilleures simulations **correspondent à une combinaison des stocks reconstitués à partir des quantiles de niveau 0.2 ou 0.3 de la densité de stock de l'AM pour la statistique de 1892, de 0.3 pour celle de 1908 et de 0.4 ou 0.5 pour la statistique de 1929 (Tableau 4)**, c'est-à-dire des quantiles de rang inférieur à ceux des valeurs moyennes ou centrales. **Ces quantiles suggèrent qu'au début du siècle, les forêts étaient, en moyenne, moins capitalisées que les forêts actuelles (635 millions de m³ et 64,9 m³/ha en 1892 pour le quantile 0,30 et 706 millions de m³ et 71,8 m³/ha en 1908 pour le quantile 0,30; Tableau 5.6).**

Modèle	Modèle de							
	Dinf (m ³ /ha)	tDinf (ans)	Dmax (m ³ /ha)	Dini (m ³ /ha)	surfaces forestières (0 ou 1000)	D0 (m ³ /ha)	Combinaison de quantiles	RMSEP (x 10 ⁶ m ³ /ha)
1	201	250	400	2,5	+ 1000	25	0,30 – 0,30 – 0,40	91,90
	201	250	400	2,5	+ 1000	25	0,20 – 0,30 – 0,40	96,85
2	201	200	500	5	+ 1000	25	0,30 – 0,30 – 0,40	100,42
3	151	150	400	10	+ 1000	25	0,30 – 0,30 – 0,40	102,12
4	151	150	400	5	0	25	0,30 – 0,30 – 0,40	107,88
5	151	150	300	10	0	25	0,20 – 0,30 – 0,40	109,63
	151	150	500	2,5	0	25	0,30 – 0,30 – 0,50	110,93
	151	150	400	5	0	25	0,30 – 0,30 – 0,50	111,25
	151	150	400	10	+ 1000	25	0,30 – 0,30 – 0,50	111,28
	201	200	500	5	+ 1000	25	0,30 – 0,30 – 0,50	111,43

Tableau 5.10. Les dix jeux de paramètres minimisant la RMSEP établie entre les simulations et les stocks estimés par l'inventaire forestier national en 1976, 1986, 1996 et 2010 ainsi que les volumes reconstitués aux trois dates anciennes à partir des moyennes ou des quantiles. En gris : les cinq jeux de paramètres minimisant la RMSEP.

L'ensemble de simulations du stock de bois de la forêt française depuis 1850 est indiqué en **figure 5.16**, et distingue les meilleures simulations. Les 5 courbes de densification du stock à l'hectare correspondant à ces 5 ensembles de paramètres sont fournies en **figure 5.17**. Elles permettent d'illustrer l'accélération très lente de l'accumulation de stock net à l'hectare sur un horizon temporel d'au moins 150 ans (c'est-à-dire de 1850 à nos jours), ainsi que la prédiction – selon ce modèle – qu'un ralentissement de cette expansion ne se produirait pas avant 200 à 300 ans après 1850 (c'est-à-dire entre 2050 et 2150). L'ensemble de ces éléments suggèrent une dynamique de très long terme, et une cinétique d'accumulation qui sort du champ des faits usuellement acceptés pour des forêts gérées.

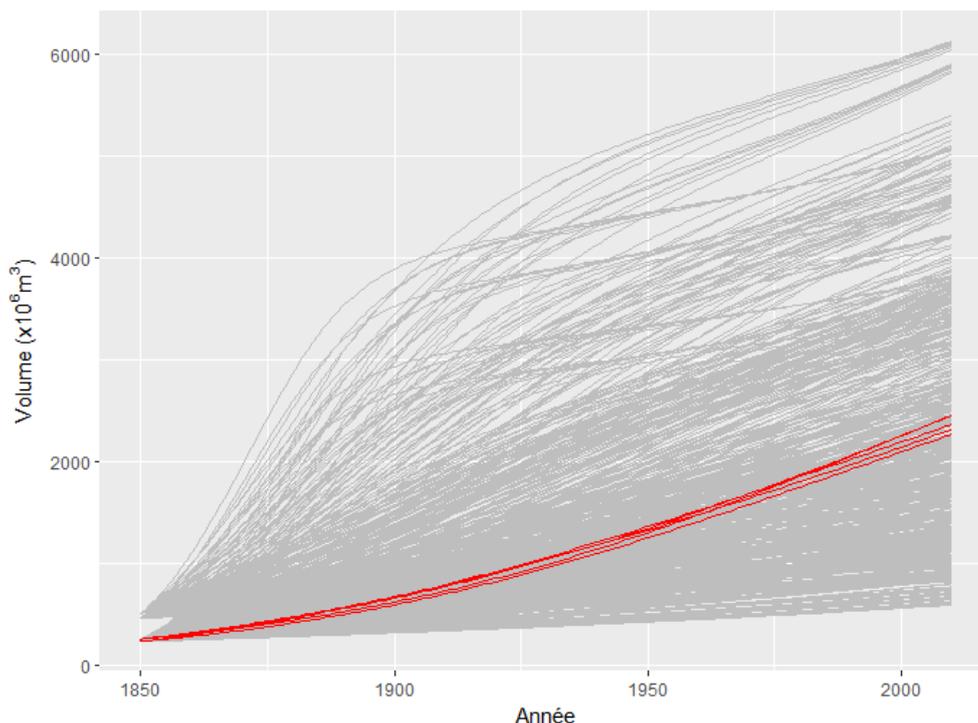


Figure 5.16. Ensemble de simulations pour l'évolution du stock de bois dans les forêts françaises. En rouge : les cinq simulations qui minimisent l'erreur quadratique moyenne.

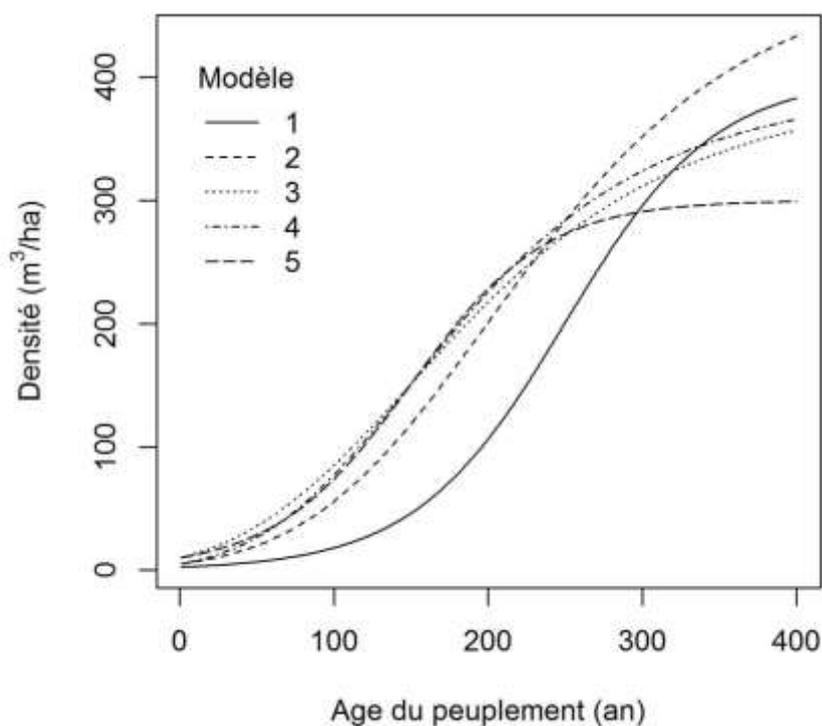


Figure 5.17. Courbes de cinétique d'accumulation de stock net à l'hectare en fonction de l'âge pour les cinq jeux de paramètre minimisant la RMSEP (voir tableau 5.10). Ces simulations sont toutes obtenues avec le modèle de Hossfeld.

4 Interprétation et discussion

4.1 Aspects méthodologiques

Nos estimations de reconstitution du stock ont montré la nécessité de prendre en compte la structure verticale des peuplements pour qu'elles soient réalistes. De plus, les estimations basées sur les moyennes semblent surestimées, signe d'une forte densification du stock sur la période étudiée. A titre d'illustration, des données anciennes sur la forêt de Haguenau permettent de mettre en avant cette densification. En effet, cette forêt indivise a connu une augmentation de sa densité de $+91 \text{ m}^3/\text{ha}$ entre 1842 et 1992 (+62% ; Geldreich, 1994), liée, au moins en partie, à la plantation de hêtre en sous-étage de la chênaie afin d'augmenter les volumes de bois, améliorer la qualité des fûts des chênes et limiter la végétation concurrente dans le sous-bois. Cette densification explique que les estimations les plus réalistes soient obtenues en utilisant les données AM de l'inventaire plutôt que celles de la NM. Une reconstitution basée sur les données AM, une partition prenant en compte la structure des peuplements et une imputation conditionnelle de quantiles de stock (entre 0,10 et 0,50) semble donc plus cohérente.

4.2 Principaux résultats

4.2.1 Intensité d'augmentation séculaire du stock

Sur la base de la meilleure paramétrisation (Tableau 5.10), **le stock de bois aurait pu augmenter de +300% entre 1892 et 2010 alors que les surfaces n'ont augmenté seulement que de +60%**, ce qui constitue une augmentation de $+97 \text{ m}^3/\text{ha}$ pour la densité de stock au cours de la période. Cette augmentation, très rapide, est très proche de celle qui a été estimée en Suisse à partir d'un modèle (+292% entre 1860 et 2006 ; Usbeck *et al.*, 2010).

Nos simulations montrent que les forêts françaises présentaient une densité très faible au début du siècle ($25 \text{ m}^3/\text{ha}$ en 1850). Cette densité est d'autant plus faible qu'en 2010, les taillis présentent une densité moyenne de $66 \text{ m}^3/\text{ha}$ et sont donc déjà plus que deux fois plus denses que ces forêts. L'utilisation du modèle de Hossfeld pour la reconstitution de l'évolution du stock montre la **lente capitalisation des forêts au début de la chronologie.**

4.2.2 Puits de carbone des forêts

On remarque que les modèles minimisant la RMSEP sont assez proches au niveau de leurs paramétrisations (Tableau 5.10) et présentent des évolutions de stocks proches (Figure 5.16), bien qu'ils présentent des trajectoires de densité de stock en fonction de l'âge assez différentes (Figure 5.17). Ces modèles présentent cependant toujours une trajectoire convexe sur la période d'étude avec un point d'inflexion constamment au-dessus de 150 ans, ce qui

couvre l'ensemble de la période 1850-2000. Cela suggère que **les forêts françaises se sont densifiées sans saturation depuis plus de 150 ans, constituant un puit de carbone sur cette période**. De plus, l'ensemble des modèles présentent une densité maximale élevée (400 et 500 m³/ha en général), suggérant que **l'accumulation de stock sur pied est loin de la saturation et devrait ainsi continuer de constituer un puit de carbone pour encore plusieurs siècles, toutes choses égales par ailleurs**.

4.2.3 Hypothèses explicatives à l'accélération d'accumulation de stock

Si l'on reprend le bilan précédemment présenté en partie III – 3.2.3, on peut le simplifier et l'écrire comme suit :

$$V_{t+\Delta t} = V_t + C_R - P_t \quad (17)$$

Avec V_f le volume final, V_0 le volume initial, C_R la croissance globale (comprenant croissance et recrutement) et P_t les prélèvements globaux (comprenant prélèvement et mortalité).

Cette équation peut s'écrire également sous la forme suivante :

$$V_t = (1 + q)^t \cdot V_0 \quad (18)$$

Avec :

$$q = \frac{C_R - P_t}{V_0} \quad (19)$$

Entre 1892 et 1908, q peut être estimé et on obtient $q = 0,6\%$. De même, il est possible d'estimer la valeur de q nécessaire à l'augmentation de stock estimée entre 1892 et 2010. Pour s'affranchir de l'effet des plantations sur q , le stock de 2010 a été diminué de 17,5% (estimation d'un minimum de 17,5% du volume actuel provenant des forêts récentes ; **Annexe V.3**). On obtient alors, $q = 1\%$. Cette différence de 0,4% entre les deux estimations montre qu'avec un coefficient constant, une augmentation du stock aussi importante que celle observée n'aurait pas été possible. L'augmentation de q sur la période peut être due à une augmentation de la croissance globale et/ou à une diminution des prélèvements globaux.

Nous avançons donc deux hypothèses pour essayer de rendre compte de l'accumulation très lente et accélérée du stock: l'une liée à l'augmentation de la croissance des forêts, et la seconde liée à la dynamique des prélèvements en forêt.

La première hypothèse peut être liée à l'augmentation de la fertilité des forêts suite à une forte exploitation et aux changements de croissances liés aux changements environnementaux (voir partie I – 2.3.1). Les forêts de 1850, à l'évidence surexploitées (proximité du minimum forestier) ont pu faire l'objet d'une reconstitution progressive de fertilité (Glatzel *et al.*, 1999). La surexploitation des forêts a touché la strate forestière (Marie et Feuvrier, 1990) mais aussi les sous-bois (surpâturage ; Némoz-Rajot, 1998) et les sols (enlèvement des litières ; Henry, 1901 ; Schwappach, 1900), bien que cette dernière pratique n'ait été, à priori, que peu effectuée en France. **Cette surexploitation globale entraînant, à la fois, une baisse de la densité de bois et une perte de la fertilité du sol, peut expliquer cette faible capitalisation initiale de ces forêts, mais surtout leur lente capitalisation.**

On peut tenter d'explorer la seconde hypothèse à partir de données additionnelles de prélèvements. En effet, les statistiques anciennes (statistiques agricoles de 1892 et 1929 et statistique Daubrée) renseignent sur les prélèvements de bois en forêts au début du XX^{ème} siècle. A partir de ces données et des données de prélèvements de l'IFN, il est possible d'étudier l'évolution des prélèvements depuis 1892.

Différentes catégories sont répertoriées dans les statistiques anciennes. Un travail d'homogénéisation des informations apportées et de conversion des productions en mètres cubes a été effectué (**Annexe V.4**). Il a été possible de séparer la production entre bois d'œuvre et d'industrie (BOI) et bois de chauffage. Ces productions correspondent à l'ensemble du bois commercialisé (troncs et branches) et ne peuvent être directement comparées aux données de prélèvement de l'IFN qui correspondent au volume bois fort tige de l'ensemble des arbres prélevés (commercialisés ou non) de plus de 7,5 cm de diamètre à 1,30 m.

Les prélèvements IFN ont été calculés soit à partir du bilan des flux pour les données AM (voir chapitre IV) soit à partir des prélèvements relevés en retournant sur le point 5 ans après pour les données NM (voir partie II - 2.1). Des données plus anciennes ont été mises à notre disposition pendant l'analyse, nous permettant, pour 53 départements, de calculer les prélèvements sur une période encore plus récente (en moyenne en 1980 ; **Figure 5.1**).

Sachant qu'en 1892 et 1908 l'Alsace-Moselle, alors annexée, n'était pas inventoriée, un volume prélevé relatif a été calculé afin de pouvoir comparer ces résultats à ceux de 1929 (**Figure 5.18**).

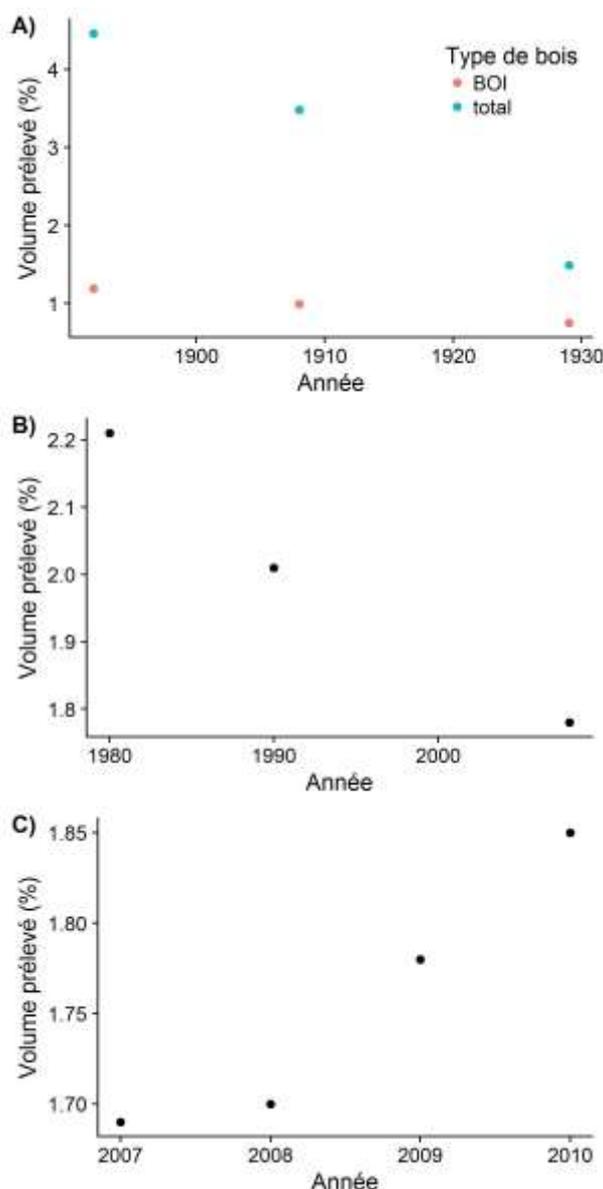


Figure 5.18. Volume relatif prélevé à partir des données des statistiques agricoles de 1892 et 1929 et de la statistique Daubrée (1908 ; A) et des données IFN (B et C). Dans le graph B, la donnée de 2008 est une moyenne des prélèvements entre 2006 et 2010 et celle de 1980 est évalué sur seulement 53 départements. Le graph C présente des moyennes sur 3 ans consécutifs.

Nos résultats montrent **qu'entre 1892 et 1929 et entre 1980 et 2008, le taux de prélèvement en volume a diminué**, ce qui peut avoir contribué à la forte croissance du stock observé dans nos simulations et l'accélération de son expansion au début de la période 1850-2010. **Cependant, l'intensité de ces changements de prélèvement (Figure 5.18) est faible** et ne semble pas avoir dépassé 1% par an. **Ces changements ne paraissent intuitivement pas à même d'expliquer une variation de stock de plus de 250% sur le siècle**, ce qu'une

simulation plus mécaniste, fondée sur un modèle démographique, pourrait permettre d'explorer.

Les données des statistiques anciennes estiment la production totale, prenant en compte le bois d'œuvre et d'industrie ainsi que le bois de chauffage. On remarque alors la forte part, à cette époque, du bois de chauffage dans la production totale. Cette part diminue fortement entre 1892 et 1929. La diminution des prélèvements de bois de chauffage est en accord avec l'hypothèse d'augmentation de la fertilité des forêts.

4.2.4 Contribution des forêts nouvelles (depuis 1850) à l'expansion du stock de bois

Bien que la concordance entre les stocks simulés par les cinq modèles minimisant la RMSEP représente bien l'évolution du stock reconstituée à partir des combinaisons de quantiles (20%, 30% et 40% ou 30%, 30% et 40% pour 1892, 1908 et 1929 respectivement ; **Figure 5.18**), on remarque que ces modèles ne présentent pas une pente aussi forte que celle observée par l'inventaire forestier depuis 1976.

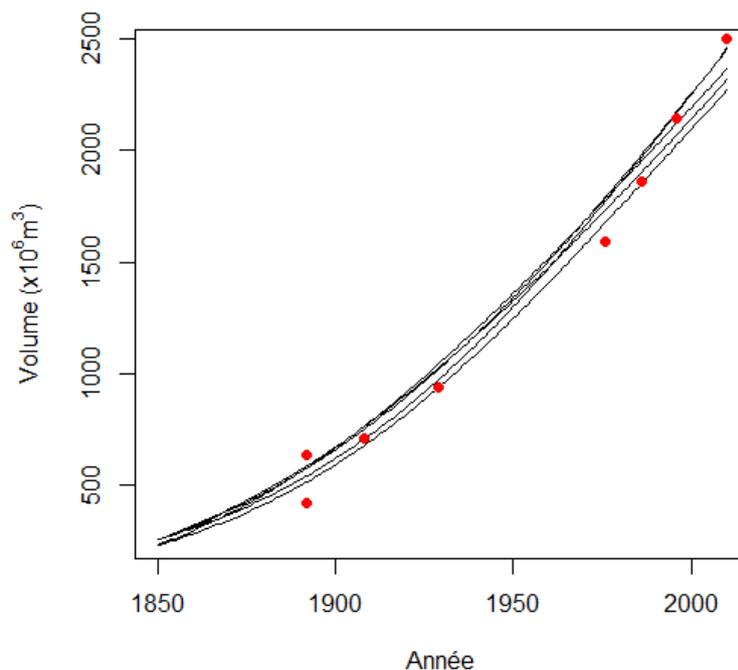


Figure 5.19. Courbes d'évolution du stock issue des cinq simulations de moindre erreur, et les stocks observés (en rouge) par l'inventaire forestier en 1976, 1986, 1996 et 2010 et les stocks reconstitués à partir des quantiles 20 et 30% en 1892, 30% en 1908 et 40% en 1929.

Les parts du stock en 2010 provenant des forêts anciennes (déjà présentes en 1850) ou récentes (arrivées depuis) ont été estimées grâce aux cinq modèles présentant la plus faible RMSEP (**Tableau 5.10**). Les résultats montrent **une faible contribution des forêts récentes**

(entre 2,5 et 11,1% ; Figures 5.20, 5.21, 5.22, 5.23 et 5.24 ; Tableau 5.11), en deçà de ce qu'on peut reconstituer rétrospectivement (estimation d'un minimum de 17,5% du volume actuel provenant des forêts récentes ; Annexe V.3). Cela implique que **la courbe d'évolution de la densité a pu évoluer avec le temps**, en lien, par exemple, avec l'augmentation de la productivité des forêts françaises au cours du XX^{ème} siècle (Charru *et al.*, 2010 et 2014) ou à la plantation et mise en valeur sylvicole d'espèces à croissance rapide (dont les plantations principalement résineuses du FFN ; Rosenbaum et Lindsay, 2001 ; partie I – 1.3.4)

Le modèle pourrait être amélioré en incluant un modèle de densité dépendant du temps ou un modèle de densité différent (de type exponentielle négative) pour les nouvelles forêts provenant de plantations.

Modèle utilisé	Part des forêts récentes dans le volume total	
	(%)	
1	2,5	
2	6,9	
3	11,1	
4	8,7	
5	9,5	

Tableau 5.11. Part des forêts récentes dans le volume forestier total en 2010 d'après les simulations basées sur les 5 modèles présentant la plus faible erreur (voir Tableau 5.10)

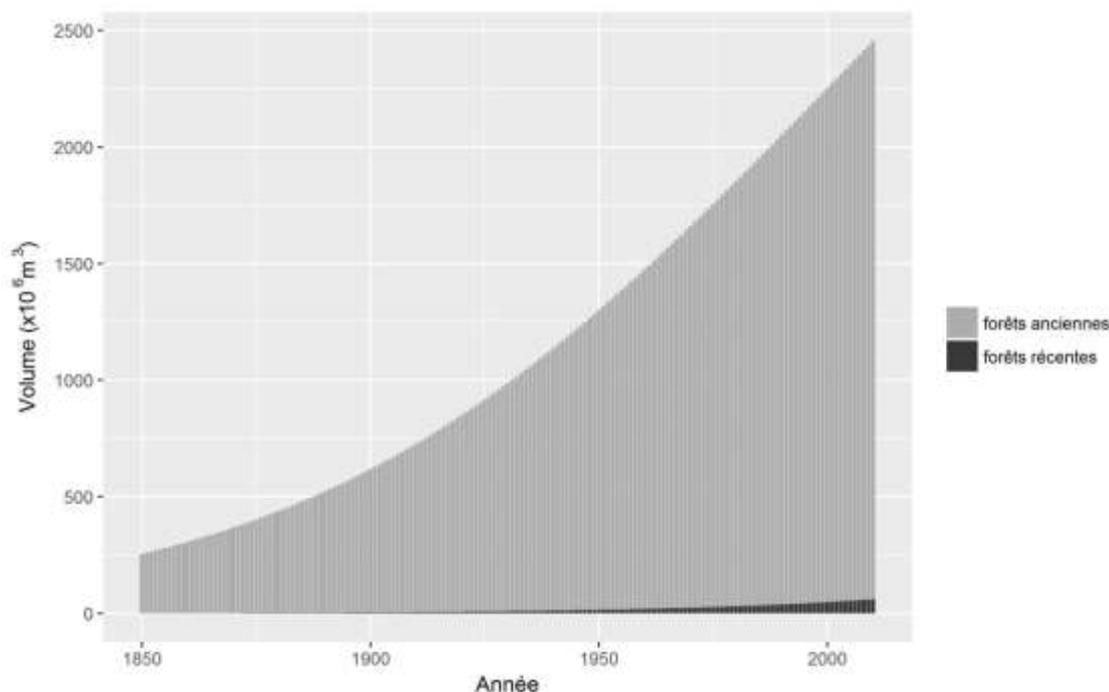


Figure 5.20. Volumes prédits par la simulation à partir du modèle 1 entre 1850 et 2010 selon le type de forêt. Forêts anciennes : forêts déjà présentes en 1850. Forêts récentes : forêts apparues depuis 1850.

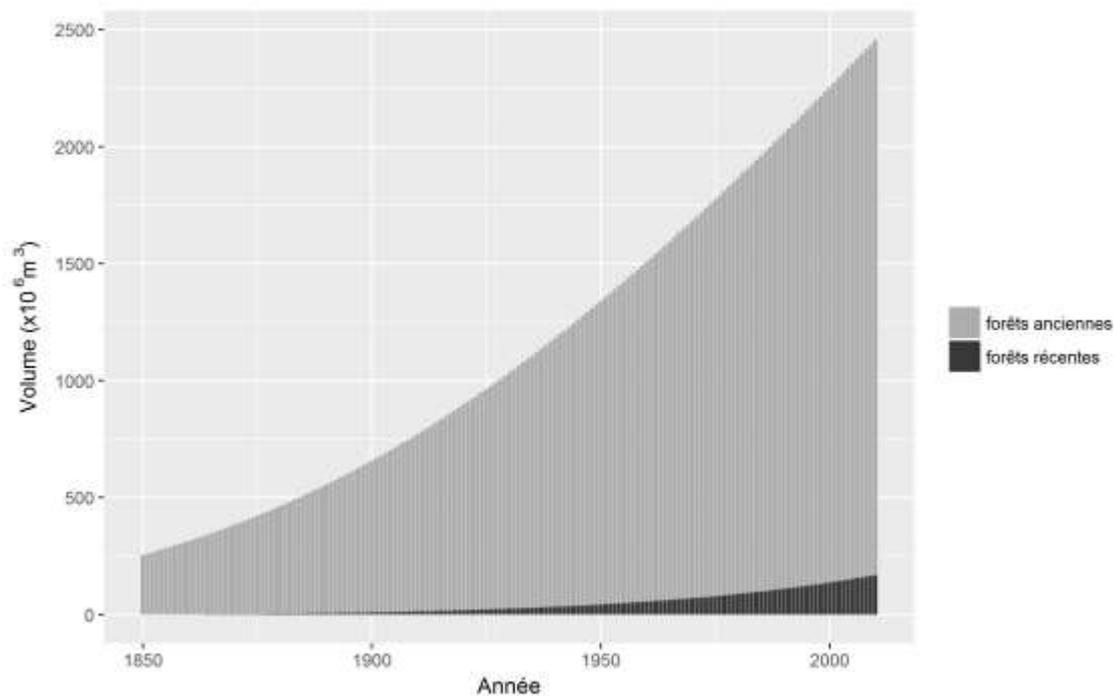


Figure 5.21. Volumes prédits par la simulation à partir du modèle 2 entre 1850 et 2010 selon le type de forêt. Forêts anciennes : forêts déjà présentes en 1850. Forêts récentes : forêts apparues depuis 1850.

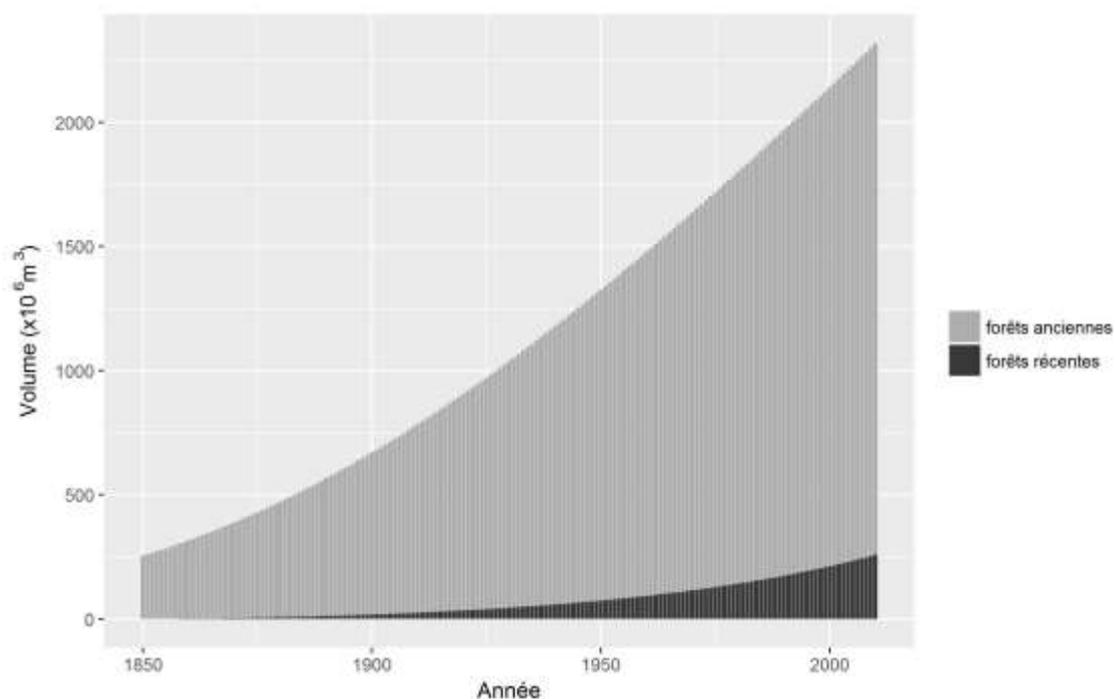


Figure 5.22. Volumes prédits par la simulation à partir du modèle 3 entre 1850 et 2010 selon le type de forêt. Forêts anciennes : forêts déjà présentes en 1850. Forêts récentes : forêts apparues depuis 1850.

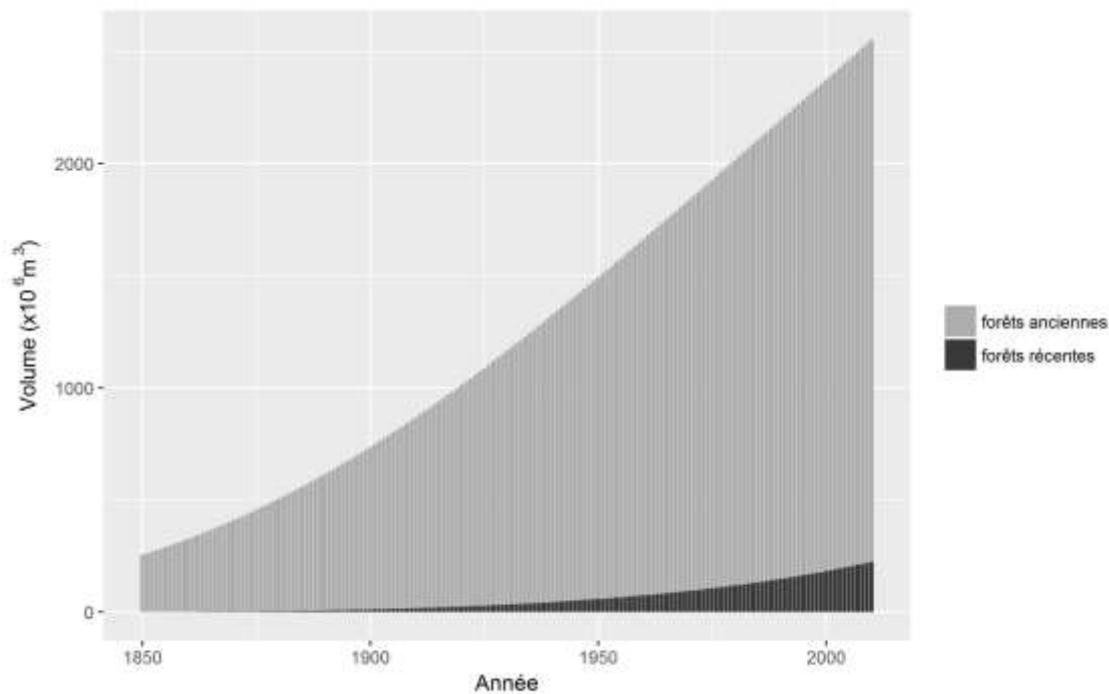


Figure 5.23. Volumes prédits par la simulation à partir du modèle 4 entre 1850 et 2010 selon le type de forêt. Forêts anciennes : forêts déjà présentes en 1850. Forêts récentes : forêts apparues depuis 1850.

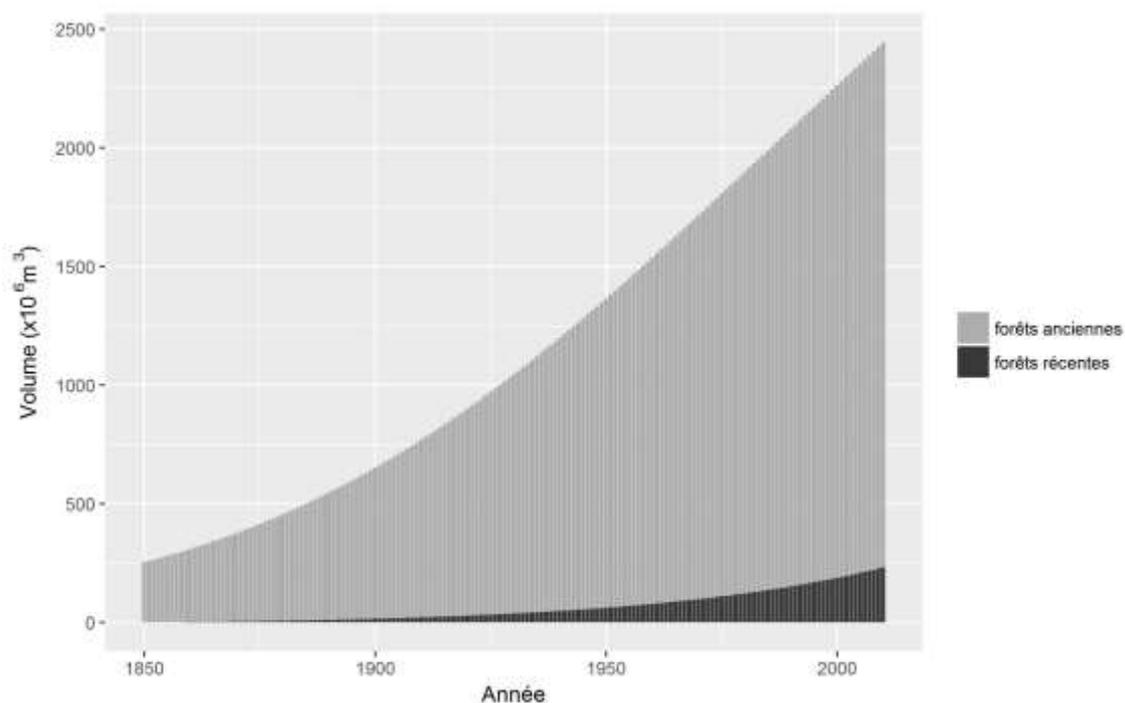


Figure 5.24. Volumes prédits par la simulation à partir du modèle 5 entre 1850 et 2010 selon le type de forêt. Forêts anciennes : forêts déjà présentes en 1850. Forêts récentes : forêts apparues depuis 1850.

Résumé du chapitre V

Avant la mise en place de l'IFN, aucune statistique forestière n'apportait d'information sur le stock sur pied des forêts. L'analyse de l'évolution sur le long terme de ce stock ne peut se faire sans une estimation préalable de ces stocks anciens.

Dans ce chapitre, nous avons utilisé une méthode d'imputation conditionnelle afin d'estimer les stocks anciens à partir des stocks à l'hectare des forêts inventoriées par l'IFN et des surfaces informées par les statistiques anciennes (1892, 1908 et 1929). Deux jeux de données de l'IFN ont été utilisés : le premier inventaire disponible en base et un inventaire moyen NM. Une partition par département, type de propriété et structure forestière a été utilisée. Les estimations ont été effectuées soit à partir de la moyenne des stocks à l'hectare soit des quantiles de 10, 20, 30, 40 et 50%.

Dans un deuxième temps, une simulation de l'évolution du stock sur pied des forêts française depuis 1850 a été effectuée. Cette simulation prend en compte : i) l'évolution des surfaces depuis 1850 estimée à partir d'une régression polynomiale sur les données de surfaces anciennes (augmentées ou non de 1 million d'hectare) et les données de surface de l'IFN entre 1976 et 2010, ii) un modèle de densité des peuplements en fonction de l'âge. Trois modèles ont été testés : concave saturant, linéaire et sigmoïde. Pour chaque simulation, plusieurs hypothèses de densité initiale et de paramètres du modèle ont été testées. Les résultats de la simulation ont été comparés aux estimations de stock et aux données de stock IFN de 1976, 1986, 1996 et 2010 en calculant l'erreur (RMSEP) entre les prédictions et les différentes combinaisons possibles de stock (combinaisons fabriquées à partir des moyennes et des quantiles estimés).

Nos résultats montrent que le modèle sigmoïde est le seul à permettre de reconstituer une évolution du stock qui correspond à celle observée par l'IFN. Les temps aux points d'inflexion des meilleures simulations montrent que depuis 1850, la capitalisation globale des forêts françaises s'effectue selon une trajectoire convexe singulière. Les meilleurs résultats ont été obtenus à partir des quantiles de 30, 30 et 40% pour les années 1892, 1908 et 1929 respectivement, soulignant la forte capitalisation de la forêt française sur la période (+97 m³/ha entre 1892 et 2010). Alors que le stock sur pied a augmenté de 300% entre 1892 et 2010, la surface n'a augmenté que de 60%. La trajectoire convexe observée peut admettre deux explications hypothétiques : l'une fondée sur la diminution des taux de prélèvements au cours du temps, l'autre à une reconstitution progressive de fertilité depuis le minimum forestier. Toutefois, les variations historiques de taux de prélèvements dont nous disposons suggèrent une baisse insuffisante pour expliquer une telle variation de stock

Notre simulation a montré une incapacité partielle à séparer les contributions entre forêts anciennes (déjà présentes en 1850) et forêts récentes (apparues depuis), mettant en exergue la capitalisation différentielle de ces deux types de forêts.

VI - Discussion et conclusion

1 Rappel du contexte et des objectifs

Les forêts françaises et de la plupart des pays développés connaissent une expansion de leur surface. Cependant, alors que l'augmentation de stock sur pied est encore plus rapide en Europe (UE-28) et en France et que l'expansion de surface a été fortement étudiée (Mather *et al.*, 1999), l'augmentation de stock sur pied n'a été que très peu analysée (Pignard, 2000). Or, l'expansion en stock est au cœur de nombreuses problématiques économiques, environnementales et politiques actuelles car elle est directement liée à la disponibilité en bois, à la biomasse et au stock de carbone. Il y a donc un véritable besoin d'étudier l'évolution passée du stock sur pied, d'en comprendre ses variations temporelles et spatiales afin de pouvoir, par la suite, en prédire son évolution future. **L'étude de l'évolution du stock sur pied constitue l'originalité de cette thèse.**

Nos travaux visent à comprendre la nature de ces changements de stock sur pied dans les forêts françaises. Ces forêts présentent i) une transition ancienne (localisée au début du XIX^{ème} siècle ; Mather *et al.*, 1999 ; Meyfroidt et Lambin, 2011) ii) les plus fortes augmentations de surface et de stock parmi tous les pays d'Europe (UE-28 ; +110 000 ha/an pour la surface et + 35 millions de mètres cubes par an pour le stock entre 2005 et 2015 ; Forest Europe, 2015), iii) des données de surface et de stock sur pied relativement anciennes (données IFN depuis 1961 et données anciennes de surface, depuis le XIX^{ème} siècle), et constituent donc un très bon cas d'étude.

Le premier objectif de cette thèse était d'étudier quantitativement et qualitativement les changements de surface depuis le début du XX^{ème} siècle et de stock depuis le début de la période IFN afin i) d'en caractériser les patrons de variation spatiale et temporelle, en les décomposant par types de propriété et de composition et d'ainsi approcher les causes de ces expansions, ii) de vérifier si des premiers signes de saturation sont détectables (des premiers signes de saturation de la biomasse forestière ayant été observés en Europe par Nabuurs *et al.*, 2013) et, iii) de lier les variations de surface terrière à l'état des forêts.

Le deuxième objectif était de chercher à approcher les causes dynamiques de l'expansion du stock de bois sur pied, et de pouvoir identifier et quantifier des composantes de l'expansion de ce stock en ventilant quantitativement son augmentation selon des systèmes forestiers dont la dynamique est homogène. Il s'agissait là de tenter une typologie de l'expansion.

Notre troisième objectif a été de tenter de situer l'expansion actuelle du stock de bois dans une dynamique de plus long terme, pour essayer d'en mesurer la constance temporelle ou le caractère transitoire. A cette fin, un premier sous-objectif a consisté à proposer des chronologies plausibles du stock sur pied depuis 1850. Un second sous-objectif a ensuite été de construire un modèle simple de l'accumulation du stock de bois dans les forêts, afin de

voir à quelles conditions sur la cinétique moyenne d'accumulation il est possible de restituer les chronologies historiques plausibles du stock de bois.

2 Approches méthodologiques

2.1 Les données

Dans le cadre d'une étude de la dynamique à grande échelle des forêts françaises, les données utilisées doivent à la fois i) décrire le territoire national de façon systématique ou à minima être représentatives de contextes significatifs, et ii) permettre une analyse temporelle sur le long terme, c'est-à-dire sur une période de temps allant de quelques décennies jusqu'à un horizon séculaire dans la mesure du possible.

La France a la chance de disposer d'un programme d'inventaire forestier depuis 1958, n'étant en cela précédée que par les pays nordiques (décennie 1920) ainsi que les Pays-Bas où la ressource forestière est la plus faible de l'Europe continentale (1938 ; Tomppo *et al.*, 2010). Si le premier inventaire départemental est daté de 1961 (Gironde), **il faut attendre 1980 pour disposer d'une première couverture complète de la forêt française (Figure 2.1, partie II), définissant un premier horizon d'analyse substantiel à une quarantaine d'années, qui a été mis à profit dans le chapitre III (1976 – 2015).**

La disponibilité de statistiques anciennes sur la forêt française (Audinot, 2016), mise en évidence dans le contexte du centenaire de la statistique Daubrée (Journée Daubrée, 2012¹¹), a formé une opportunité importante pour tenter d'étendre la perspective temporelle sur les évolutions mises en évidence et d'allonger notre période d'étude. Ces statistiques anciennes souffrent cependant de 2 défauts importants : 1) aucune définition n'est spécifiée concernant la surface forestière, ou sur la classification des surfaces en espèces dominantes (statistique Daubrée ; Daubrée, 1912) et plus généralement, aucun élément de protocole sur ces enquêtes n'est fourni, rendant l'appréciation de la pertinence de ces données difficile, 2) aucune donnée de stock de bois n'est fournie.

2.1.1 Les données IFN et le suivi de l'expansion forestière à la fois en surface et en stock sur pied

Les données de l'IFN se sont montrées être un très bon moyen de suivre la progression des forêts françaises en surface et en stock. Ces données ont l'avantage d'être issues d'un inventaire systématique de l'ensemble du territoire national métropolitain dont la méthodologie a peu varié dans le temps. Cependant, avant 2005, l'inventaire était départemental et une lecture nationale n'a pas été possible sans interpolation des données entre deux inventaires.

¹¹ <http://www2.agroparistech.fr/podcast/-Journee-Daubree-a-l-IGN-.html>

Nos résultats ont montré un intervalle de confiance étroit autour des chronologies de surface et de stock (voir article 2). La précision des données IFN anciennes était donc très satisfaisante, dans le cadre d'une étude à large échelle spatiale qui agrégeait l'ensemble des inventaires départementaux. Depuis 2005, cet intervalle de confiance a, cependant, tendance à s'élargir, du fait de la diminution du nombre de points d'inventaire (voir article 2).

De façon marquante, les chronologies d'évolution de la surface et du stock établies sur la période décrite par l'inventaire forestier (1976-2010 ; partie III ; articles 1 et 2) présentent des **tendances très constantes, sans variation de rythme, nous empêchant d'identifier la phase dans laquelle se trouve aujourd'hui l'expansion de la forêt française (i.e. phase primaire d'accélération de l'expansion, ou phase tardive de saturation)**, et soulignant le caractère encore restreint de cette période de 40 ans pour étudier des phénomènes forestiers aussi lents.

Les données IFN ont aussi l'avantage de présenter des informations dendrométriques nombreuses permettant une analyse de la dynamique des forêts à travers le calcul de flux. Une étude a permis de montrer une sous-estimation des prélèvements relevés en ancienne méthode (partie IV – 2.2), empêchant une utilisation de cette donnée sur l'ensemble de la période d'étude. Un bilan de flux a donc dû être utilisé afin d'estimer les prélèvements.

2.1.2 Les statistiques anciennes, des informations sur les forêts au début du XX^{ème} siècle

Afin d'améliorer la compréhension de la dynamique forestière, et il a été nécessaire de l'étudier sur des temps longs de l'ordre du siècle (voir parties III et V). Les données des statistiques anciennes (statistiques agricoles et statistique Daubrée) ont permis de pallier, en partie, ce manque pour ce qui est des surfaces mais une reconstitution, effectuée grâce aux données de l'inventaire national, a été indispensable pour le stock sur pied.

Trois jeux de données anciens, apportant une description de la forêt à une échelle plus fine que le grain national (i.e. au grain départemental), ont été utilisés : la statistique Daubrée de 1908 (Daubrée, 1912) et les statistiques agricoles de 1892 et 1929 (ministère de l'agriculture, 1897 et 1936). Ces données anciennes permettent d'avoir une image de la forêt à la fin du XIX^{ème} et au début du XX^{ème} siècle, c'est-à-dire près de 100 ans après la période supposée du « minimum forestier ». Cependant, ces données présentent certains inconvénients non négligeables :

- Les limites du territoire français ont évolué avec le temps. Les statistiques de 1892 et 1908 ne présentent aucune donnée sur l'Alsace-Moselle, annexée à cette époque. Il a donc été nécessaire de trouver d'autres sources de données (Huffel, 1920 ; Ministerium Für Elsaß-Lothringen, 1909, décrivant les forêts d'Alsace-Moselle en 1908, c'est-à-dire à la même année que la description de la statistique Daubrée) afin de compléter ce manque. Cette compilation de données anciennes peut apporter de l'incertitude qui est cependant non mesurable vu que les protocoles ne sont que très

peu explicités et qu’aucune mesure d’erreur n’est donnée. De plus, dans ces autres sources, les surfaces forestières sont ventilées seulement par type de propriété. Aucune information sur la structure des peuplements ou leur composition n’est disponible.

- Très peu d’informations sont disponibles sur la manière dont ces données ont été collectées. Leur inter-comparaison a permis cependant de montrer une forte cohérence entre ces données, confirmant une certaine fiabilité de leurs résultats (Audinot, 2016). L’analyse a cependant montré une possible sous-estimation des taillis dans les données de la statistique Daubrée. A cette époque, les taillis sont en pleine conversion et il est possible que la quantité de taillis en cours de conversion ou même de futaies, ait été surestimée, et la quantité de taillis simples sous-estimée, afin de satisfaire aux directives nationales.
- La description de la forêt française reste très sommaire et aucune donnée sur le stock sur pied n’est disponible.

Les données anciennes ont fait l’objet d’une vérification systématique de leurs données, permettant de relever des erreurs liées à une mauvaise saisie des données au moment de leur compilation, des erreurs de calcul des totaux ou des erreurs de typographie (Audinot, 2016).

Afin de reconstituer les variations de surface depuis 1850, ces données ont été complétées par des estimations plus anciennes au niveau national (partie V).

2.1.3 Homogénéisation des données

L’assemblage de statistiques de différentes provenances ainsi que le changement de méthode de l’IFN a demandé un travail d’homogénéisation des données et d’inter-comparaison des données anciennes (1892, 1908 et 1929) afin de pouvoir les utiliser de façon adéquate. Cette inter-comparaison s’est basée sur l’analyse des changements de définition de la forêt dans le protocole IFN (changement de méthode en 2005) mais aussi sur la concordance des ventilations utilisées par les différentes statistiques en ce qui concerne le type de propriété (**Tableau 2.3**) et les régimes forestiers (**Tableau 2.4**). Cela a conduit, parfois, à restreindre la période d’étude (exemple de l’étude par type de composition sur la période IFN ; articles 1 et 2).

Le manque d’information sur le protocole utilisé en 1908 pour ventiler les surfaces par composition nous a entraîné à utiliser des catégories très agrégées (feuillus/résineux) pour comparer les données de la statistique Daubrée à celles de l’inventaire forestier national.

Le changement de méthode IFN en 2005 s’accompagne d’un changement dans la définition de la forêt utilisée et dans la façon de relever certaines données (voir partie II – 2.1). Il a donc été indispensable d’étudier en profondeur ces changements afin d’utiliser de façon adéquate les données. Un biais dans l’estimation des surfaces, lié au changement de méthode, a été observé (voir partie II – 3.2), empêchant l’étude des changements de vitesse d’extension de la forêt entre les deux méthodes (article 2).

2.2 Facteurs de partitionnement de la forêt

La transition forestière est un phénomène qui a été dans un premier temps étudié au niveau national (Mather, 1992 ; Mather *et al.*, 1999 ; Rudel *et al.*, 2005). Nous avons donc voulu voir s'il existait des variations de son intensité au sein du pays afin d'approcher l'effet de la gestion et du milieu sur cette expansion.

La forêt française est très hétérogène du point de vue de sa composition et de sa structure verticale (taillis, futaie,...). Elle compte 13 des 14 grands types forestiers décrits en Europe par Barbati *et al.* (2014) et présente 90 espèces identifiées par l'IFN (voir partie II – 2.1). Cette diversité traduit une diversité de milieux (montagne, plaine, *etc.*) et de gestions (plantations, conversions des taillis-sous-futaie, *etc.*). Il était donc important de la prendre en compte dans notre étude afin de contextualiser l'expansion forestière. Pour cela, **il a été décidé de travailler à partir de strates à priori homogènes et stables dans le temps.** Plusieurs facteurs de partition ont donc été utilisés (département/GRECO, propriété et composition).

Notre étude est une étude au niveau national, il était donc important que le nombre de strates formées par les différents niveaux de partition ne soit pas trop important afin de permettre l'intelligibilité des résultats. Ainsi, nos facteurs de partition ne devaient pas être trop nombreux et devaient pouvoir facilement s'appliquer à l'ensemble du territoire.

2.2.1 Variations spatiales (interdépartementales/ou inter-GRECO)

Pour étudier les variations spatiales et biogéographiques de l'expansion, une partition par GRECO, représentant des zones homogènes d'un point de vue écologique (IFN, 2011a), a été utilisée et, vu que l'inventaire ancienne méthode (AM) est départemental, cette partition a demandé à rattacher les départements à une approximation de la partition des GRECO.

Les changements de surface et de volume forestiers observés par département ou GRECO ont pu être rapprochés d'informations sur des politiques de plantation, de changement d'occupation du sol, de contraintes de milieu ou de tempêtes afin d'en comprendre l'origine (ex : plantations du FFN dans le Massif Central, tempête de 1999 et 2009, *etc.*).

2.2.2 Type de propriété et information d'intensité de gestion

Trois types de propriétés ont été distingués : forêt domaniale, autres forêts publiques soumises au régime forestier (essentiellement communales) et forêt privée. Ce découpage différencie les forêts publiques soumises des forêts privées (regroupant forêts privées et forêts publiques non soumises) et, au sein des forêts soumises, les forêts domaniales et les autres forêts publiques soumises. Cette différenciation entre les deux types de forêts soumises est particulièrement importante car nous avons observé que leur dynamique est assez différente (**Figure 4.26**) et que les forêts communales ont une dynamique souvent plus proche de celle des forêts privées que des forêts domaniales (articles 1 et 2 ; **Annexes IV.10 et IV.11**). **Ainsi, il semble que les forêts communales, bien que soumises au régime forestier, aient une**

histoire et une gestion plus similaire à celle des forêts privées gérées qu'à celle des forêts domaniales.

Ce facteur permet ainsi une séparation par intensité de gestion. En effet, seuls 27% de la surface des forêts privées sont couverts par un plan de gestion (de Galbert *et al.*, 2015). Cependant, pour améliorer notre partition, il aurait été utile de pouvoir différencier les forêts privées soumises à un plan simple de gestion (PSG) de celles non soumises. Une étude sur un période courte et très récente (2008-2013) a montré que l'expansion en stock sur pied était plus rapide dans les forêts privées sans PSG que dans celles avec (+11% contre +4% ; IGN, 2018), montrant la véritable nécessité de les différencier.

Cette séparation entre forêts privées avec ou sans PSG aurait pu être opérée sur l'ensemble de la période d'étude d'inventaire car i) le PSG a été institué en 1963 (Morin, 2010 ; Bazire et Gadant, 1991), période à laquelle le programme d'inventaire se mettait en route, et ii) bien que la carte des forêts avec ou sans PSG ne soit disponible que depuis récemment, son croisement avec les données d'inventaire historiques devient possible dès lors qu'on dispose de coordonnées géographiques pour les points d'inventaire de l'IFN (à partir de 1983). **Le croisement entre type de propriété, type de composition et localisation des forêts (département/GRECO) a cependant permis de séparer des forêts privées, à priori fortement gérées (e.g. les forêts privées de pin maritime du Sud-Ouest et les forêts du quart Nord-Est) de celles, à priori, moins ou non gérées.**

Le découpage par type de propriété n'est pas véritablement stable dans le temps. En effet, des changements de propriété ont pu être opérés au cours de notre période d'étude. Il s'agit, par exemple, de forêts communales qui ont été soumises au régime forestier ou d'acquisitions par l'Etat de certaines forêts. Ces acquisitions sont décrites par de Galbert *et al.* (2015). Ce transfert au niveau du type de propriété peut engendrer de « fausses » variations qui ne correspondent pas à une véritable diminution ou augmentation de surface ou de stock. Cela a pu être observé lors de nos calculs de flux de surface terrière où les prélèvements étaient régulièrement négatifs dans les forêts communales, traduisant probablement une surestimation de la surface terrière à la fin de notre période d'étude, due à l'apport de nouvelles surfaces par soumission de forêts communales pendant la période d'étude.

2.2.3 Type de composition et problème au niveau de l'homogénéisation des données

Le découpage par type de composition permet d'approcher l'effet de certains choix de gestion et de politiques de plantation mais aussi de l'altitude, dans le cas des forêts montagnardes, et vient compléter les informations apportées par la géographie et le type de propriété.

2.2.3.1 Etude qualitative et quantitative de l'expansion (partie III) et restriction de la période d'étude pour la partition prenant en compte les compositions

Notre étude des changements de surface et de stock des forêts françaises par type de composition a été très restreinte dans le temps pour deux raisons :

- Le changement de méthode de l'IFN a entraîné un changement dans la mesure du couvert relatif des essences, et donc de la composition. Il a donc été choisi, dans un premier temps, d'étudier les changements de surface et de stock par composition en utilisant seulement les données AM.
- Au début de notre étude, les premiers cycles d'inventaire n'étaient pas disponibles de façon directe. A cause de cela, les informations sur la composition de ces inventaires n'ont pas pu être utilisées, obligeant à commencer nos études à ce grain en 1987 (contre 1976 pour les autres partitions).

La période d'étude résultante est très courte (1987-1994 contre 1976-2010 pour les autres partitions) alors que **l'expansion est un phénomène qui doit être étudié sur le long terme pour ne pas être masquée par des variations temporaires**. Les variations observées sur cette période ont cependant pu être comparées à celles observées sur la NM (2006-2014 ; voir article 2), permettant ainsi d'allonger la période d'étude.

Depuis peu, des données des inventaires plus anciens ont été mises à notre disposition. En utilisant ces données, il serait possible de récupérer 7 ans d'analyses et d'étudier les changements de surface et de volume par type de composition depuis 1980.

2.2.3.2 Etude de la dynamique (partie IV) et utilisation de la donnée de l'essence de l'arbre

La donnée de composition existante en nouvelle méthode (NM) n'a pas pu être recréée en ancienne méthode, malgré l'utilisation de la variable IMPRESS (voir partie IV - 2.1). Il a donc été décidé d'analyser les flux au niveau des essences d'arbres et non de la composition du peuplement (voir partie IV – 3.4). Ce découpage permet une analyse plus approfondie que le simple découpage feuillus/résineux. Cependant, il est lié à l'arbre et non plus au point d'inventaire (et ne correspond donc pas à des ensembles forestiers au sens physique mais à des stocks de bois) et ne permet donc pas une analyse des surfaces.

La reconstitution des compositions (identifiées à partir des taux de couvert libre relatifs - TCLR ; voir partie IV – 2.1) à partir des surfaces terrières relatives des point a été envisagée. Cette méthode, basée sur la donnée de niveau arbre, a l'avantage de permettre une homogénéité entre les deux méthodes de l'IFN. Cependant, la donnée liée à l'arbre est relevée sur une placette de 15 m alors que la donnée de TCLR (donnée décrivant le peuplement) est relevée sur une placette de 25 m (voir partie II – 2.1). Ainsi, **la donnée de peuplement est plus à même de prendre en compte la diversité forestière**.

2.2.3.3 Données de composition de la statistique Daubrée

La donnée de composition de la statistique Daubrée consiste en une liste d'espèces ou groupes d'espèces. **Aucune information n'est apportée sur la façon dont cette donnée a été relevée**. Sachant que la part actuelle des mélanges dans la forêt française est très conséquente (Morneau *et al.*, 2008), on peut penser que l'essence indiquée correspond à l'essence dominante des forêts mais il est impossible de savoir s'il s'agit d'une essence objectif au sens

de l'aménagement forestier (lorsqu'il s'agit par exemple de forêts publiques), ou de l'essence principale du point de vue du volume, du taux de couvert ou même de la production. Nous avons donc préféré étudier l'information de composition en la séparant en deux modalités simples (feuillus et résineux) et ainsi d'engendrer le moins de biais possible.

2.2.4 Autres critères de partition envisagés

D'autres critères de partition ont été envisagés comme l'altitude, la structure du peuplement et la classe de diamètre des arbres.

2.2.4.1 Critère d'altitude

Celui de l'altitude aurait pu venir en complément de la géographie et du type de composition afin de mieux circonscrire le phénomène de déprise agricole, surtout dans les milieux montagnards, mais **la donnée d'altitude n'était pas disponible pour l'ensemble des inventaires AM ne permettant qu'une analyse très restreinte dans le temps** (1997-2010 ; voir partie III – 4.2) et ne prenant pas en compte l'ensemble des départements français. Une première analyse très réduite prenant en compte ce facteur a été effectuée et a permis de montrer que les plus fortes intensités d'expansion en surface et en stock sont observées dans les milieux de moyenne altitude (entre 400 et 1400 m ; voir partie III – 4.2). Il serait peut-être possible, en récupérant la localisation des points d'inventaires plus anciens, d'étendre cette étude à l'ensemble de la France et à une période de temps plus longue.

2.2.4.2 Critère de structure forestière verticale

Le critère de structure forestière verticale figure naturellement parmi les facteurs de stratification auxquels on peut songer, puisqu'il peut permettre une identification plus précise des systèmes de production forestiers (notamment peuplements équiennes, ou taillis et taillis-sous-futaie), permettant par exemple de distinguer plus sûrement les systèmes de production sous-jacents aux groupes de facies forestiers de feuillus sociaux de plaine et moyenne montagne (2/5 de l'expansion ; **Figure 4.41** ; **Figure 4.43**) et ceux des forêts privées gérées (1/5 de l'expansion). **Il n'a cependant pas été retenu dans la mesure où, dans un contexte d'expansion, la structure forestière elle-même est appelée à changer au cours du temps**, conduisant à une non-indépendance des strates de la forêt, et à la possibilité de glissement de fractions du stock de bois entre strates (voir cas déjà soupçonné d'un glissement de la forêt privée vers la forêt communale, section partie IV – 3.3). **De façon essentielle, les facteurs de stratification de la forêt doivent présenter un caractère le plus stable possible au cours du temps.** Par ailleurs, cette notion reste ambiguë, puisque peuvent être confondues la structure verticale du peuplement constatée à un instant donné, et le mode de gestion des peuplements. Ainsi une structure de taillis peut être traitée en futaie régulière (cas emblématique des conversions).

En revanche, la structure a été utilisée afin d'estimer les stocks anciens à partir des statistiques forestières et agricoles, et elle a joué un rôle essentiel pour ces estimations (**Figure 4.45**).

Dans cette situation en effet, on exploite un attribut des peuplements présentant une structure donnée à un instant donné, sans se préoccuper de sa dynamique temporelle.

2.3 La méthode d'interpolation-extrapolation, indispensable pour une lecture continue de l'évolution de la surface et du stock sur pied

Les données ancienne méthode étant départementales et non synchronisées dans le temps (partie II – 2.1 ; **Figure 2.1**), une lecture annuelle au niveau national de l'expansion n'a pu être effectuée qu'en interpolant les données entre les inventaires successifs. Cette méthode entraîne forcément une forme d'approximation dans les estimations. Son effet a été analysé (voir partie III - 4.1) et montre que l'utilisation d'une méthode d'interpolation-extrapolation peut entraîner un lissage des tendances ainsi qu'un biais au niveau de l'origine entre la courbe réelle et celle obtenue par interpolation (**Figures 3.1 et 3.2**). Ce biais est principalement dû à l'extrapolation au début de la période. C'est pourquoi, **nous avons choisi une approche conservative où les estimations sont amorcées à la date où 80% des départements avaient déjà été inventoriés au moins une fois, diminuant ainsi l'imprécision.**

La chronologie de surfaces a été créée à partir de différents seuils de pourcentage de départements déjà inventoriés (2, 30, 50, 80 et 100%) et montre un biais très faible (**Figure 6.1**). L'écart relatif entre la chronologie par interpolation-extrapolation entre 1961 et 1980 et l'interpolation entre la surface en 1908 (données de la statistique Daubrée corrigée de la ForstStatistik allemande de 1908) et celle en 1980 (donnée provenant de la chronologie par interpolation-extrapolation), date à laquelle 100% des départements français ont déjà un premier inventaire, a été calculée. Nos résultats montrent des écarts très faibles (maximum 0,22% ; **Figure 6.2**). **Notre choix d'un seuil à 80% est très prudent et une extension de la période d'étude pourrait être envisagée.**

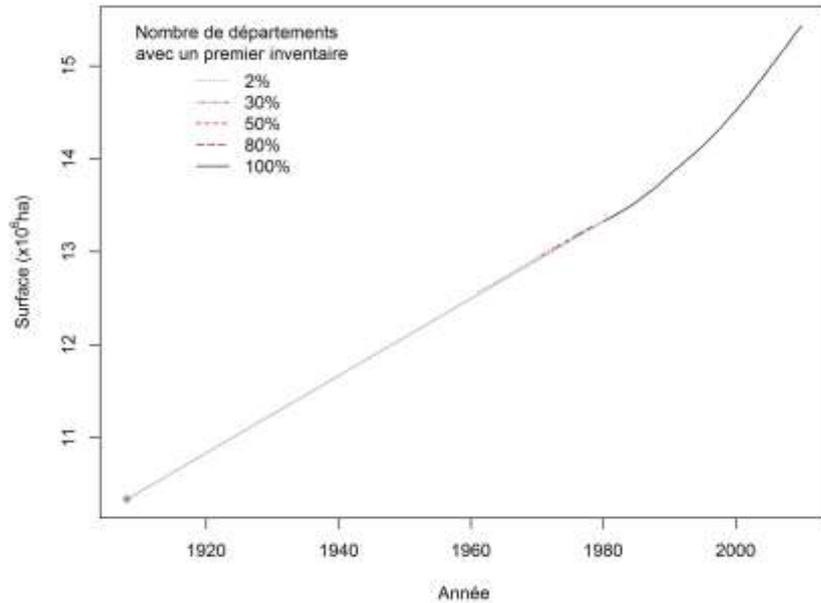


Figure 6.1. Chronologie de l'évolution des surfaces depuis 1908 (données de la statistique Daubrée Corrigée de la ForstStatistik allemande de 1908) selon la proportion de départements inventoriés au moins un fois utilisée comme seuil dans la reconstitution des surfaces IFN par interpolation-extrapolation. La ligne grise représente l'interpolation entre la surface en 1908 et la celle en 1980, date à laquelle 100% des départements français avaient été inventoriés au moins une fois.

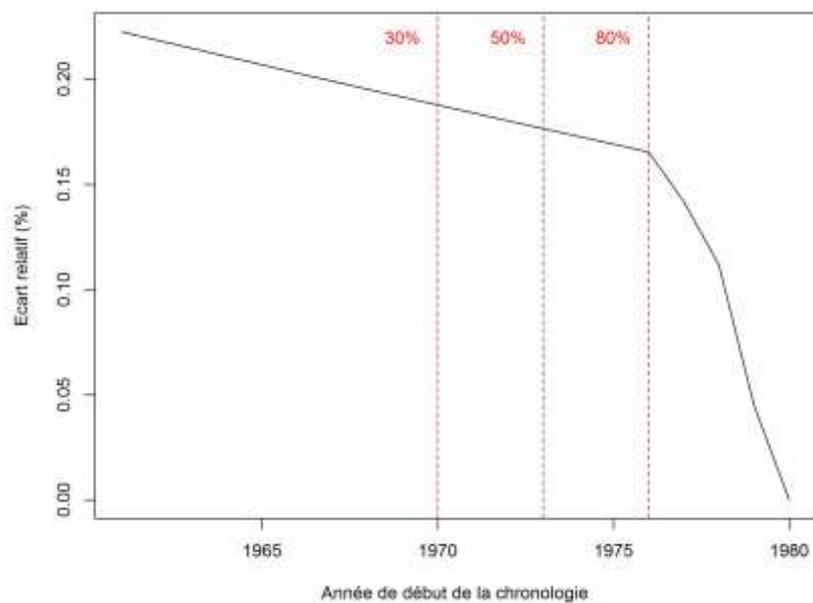


Figure 6.2. Ecart relatif entre la chronologie des surfaces entre 1961 et 1980 et l'interpolation entre la surface en 1908 et la celle en 1980 selon l'année choisie pour le début de la chronologie. Lignes rouges : seuils du nombre de départements inventoriés envisagés.

Le lissage de la courbe par l'interpolation pouvant empêcher la lecture des véritables tendances, il a été décidé que l'analyse des changements de rythme d'expansion (voir partie III) serait effectuée à partir des données brutes, sans interpolation.

Les problèmes liés à l'interpolation des données (*i.e.* lissage de la courbe et diminution de la période d'étude) sont liés à l'inventaire départemental non-synchrone (ancienne méthode). **La mise en place d'un inventaire forestier continu en 2005 (Robert *et al.*, 2010 ; Hervé *et al.*, 2014) a donc été d'une importance capitale pour l'étude future des dynamiques forestières à grande échelle.**

2.4 Calcul des flux et nécessité d'utiliser un bilan de surface terrière pour calculer les prélèvements

La donnée de prélèvement étant biaisée en ancienne méthode (voir partie IV – 2.2 ; **Annexe IV.3**), l'estimation du flux de prélèvement n'a pu être effectuée qu'à partir de l'utilisation indirecte d'un bilan de matière. **Ce bilan, effectué entre deux dates d'inventaire, ne repose pas sur les mêmes points d'inventaires, les placettes d'inventaire n'étant pas des placettes permanentes.** Il a donc été indispensable d'apporter le plus de précision possible dans les calculs des autres flux (croissance, recrutement et mortalité). Ainsi, une attention particulière a été apportée à l'estimation de la croissance radiale des arbres sur les années non couvertes par la donnée d'accroissement radial ainsi qu'à l'estimation de la mortalité sur la période non couverte par la donnée de mortalité relevée sur le terrain (les données relevées décrivent 5 à 10 ans alors que la période d'étude est en moyenne de 12,5 ans ; **Tableau 4.4**). Pour cela, **une méthode utilisant à la fois l'accroissement radial ou la mortalité relevée ainsi qu'une moyenne conditionnelle de ces flux sur le premier inventaire a été utilisée.**

Cependant, plusieurs approximations ont dû être effectuées et apportent de l'imprécision dans les estimations : approximation de l'accroissement radial sur la période totale (en moyenne 12,5 ans ; **Tableau 4.4**) des arbres à partir des IR5 et IR10 (**Figure 4.4**), approximation de l'épaisseur de l'écorce à partir d'un modèle et approximation de la circonférence à 1,30 m à partir des données de circonférence à 0,10 m pour les arbres morts (**Annexe IV.4**).

Plusieurs essais successifs de calcul des flux ont été effectués (**Tableau 6.1**). Ces essais prennent en compte ou non i) une utilisation des données à t1 (à partir d'une moyenne entre celle à t1 et celle à t2 ; partie IV – 3.2.1 et 3.2.2) pour calculer l'accroissement radial et la mortalité sur la période non couverte par la seule donnée à t2, ii) l'accroissement de l'écorce sur la période étudiée. Ils ont entraîné une diminution des prélèvements négatifs et mis en exergue l'importance de la précision de nos calculs afin d'obtenir des estimations de prélèvements les plus fiables possibles (**Annexe VI.1**).

	Utilisation d'une moyenne entre les données à t1 et celles à t2 pour le calcul de l'accroissement radial	Utilisation d'une moyenne entre les données à t1 et celles à t2 pour le calcul de la mortalité	Prise en compte de l'accroissement de l'épaisseur de l'écorce
Essai 1	Non	Non	Non
Essai 2	Oui	Non	Non
Essai 3	Oui	Oui	Oui

Tableau 6.1. Description des essais successifs d'augmentation de précision dans le calcul des flux

La comparaison entre les prélèvements calculés par la méthode du bilan et ceux relevés par l'IFN montre une forte corrélation, mais un facteur multiplicatif loin de l'unité (2,2 ; partie IV – 3.2.3 ; **Figure 4.5**) très proche de celui liant les prélèvements relevés par les protocoles en ancienne et nouvelle méthode (les prélèvements issus du protocole nouvelle méthode étant non biaisés ; les prélèvements calculés à partir du protocole nouvelle méthode sont 2,4 fois plus élevés que ceux calculés à partir du protocole ancienne méthode ; partie IV – 2.2 ; **Annexe IV.3**), confirmant ainsi la validité de nos calculs de prélèvement issus du bilan. Cependant, on observe la présence de prélèvements négatifs, impossibles. Ils sont principalement observés dans les forêts communales et les GRECO présentant une proportion importante de chênes verts (partie IV – 3.3 ; **Tableau 4.6**). Deux hypothèses expliquant ces aberrations ont été avancées : la soumission de forêts communales pendant notre période d'étude et la difficulté de la lecture des cernes du chêne vert.

2.5 Estimation des stocks anciens et modélisation de l'évolution du stock depuis 1850

Les statistiques anciennes ne présentant pas d'information de stock sur pied, celui-ci a été estimé à partir des données de l'IFN par une méthode d'imputation conditionnelle (voir partie V - 3). Un premier essai a été effectué en utilisant les moyennes conditionnelles des stocks à l'hectare selon différentes partitions (prenant en compte un ou plusieurs facteurs parmi le département, le type de propriété, la structure du peuplement et la composition en essence ; **Figure 4.45**). Les estimations associées des stocks anciens ont semblé être surestimées, au vu de la littérature qui décrit la forêt française au XIX^{ème} siècle comme appauvrie (Mather *et al.*, 1999 ; Husson et Degron, 1999 ; Degron, 1999) suite à une forte pression humaine sur les forêts, mettant en évidence la forte capitalisation générale des

forêts sur la période, mais aussi et surtout au vu de la chronologie de stock générée sur le long terme, qui semblait impossible. Ainsi, **d'autres estimations fondées sur les quantiles de 10 à 50% du stock observé en début de la période IFN (en moyenne en 1983) ont été réalisées, avec l'hypothèse centrale que – dans un contexte d'expansion du stock – même ces valeurs anciennes de densité de stock à l'hectare, observées dans les premiers inventaires de l'IFN, sont supérieures à la densité de stock qui prévalait au début du XX^{ème} siècle.** Cette approche a donné des résultats qui semblent plus cohérents graphiquement (**Figure 5.5**). Nos modèles présentent par ailleurs les courbes d'évolution des stocks au cours du XX^{ème} siècle les plus cohérentes avec les estimations du stock au début du XX^{ème} siècle utilisant les quantiles de 30 et 40% du stock de bois à l'hectare des inventaires IFN anciens, **suggérant qu'au niveau des variables conditionnelles fixées (département, propriété, structure), le phénomène d'expansion est général et rapide (+300% en 120 ans), et que les niveaux de capitalisation de la forêt d'il y a 100 ans sont plus faibles que ce que suggèrent des forêts semblables aujourd'hui.**

Trois types de modèles de densification ont été testés (chapitre V), permettant de tester trois hypothèses radicalement différentes d'accumulation moyenne de stock à l'hectare : concave saturant (modèle monomoléculaire ; **Figure 5.10**), linéaire (**Figure 5.11**), et convexe. Dans ce dernier cas, un modèle sigmoïde (modèle de Hossfeld à trois paramètres ; **Figure 5.12**) a tout de même été testé pour garantir une extrapolation éventuelle raisonnable du modèle, puisqu'il n'est pas possible que le stock à l'hectare augmente indéfiniment de façon accélérée (apparition d'un effet de densité-dépendance dans nos modèles linéaires de l'article 2). D'autres modèles auraient pu être envisagés comme, par exemple, un modèle convexe (de type modèle exponentiel positif) mais le modèle de Hossfeld a l'avantage de présenter une première partie, avant le point d'inflexion, qui présente une forme convexe et les différents temps au point d'inflexion testés ont permis d'étudier à la fois un modèle présentant seulement une dynamique convexe (lorsque le temps au point d'inflexion était supérieur à la durée de la période étudiée) et un modèle présentant une dynamique convexe puis concave (lorsque le temps au point d'inflexion était inférieur à la durée de la période étudiée).

3 Synthèse des résultats principaux

Dans cette partie, nous synthétisons les connaissances que nos études ont apportées sur la compréhension de l'expansion forestière en surface et, surtout, en stock sur pied.

3.1 Une expansion ancienne, plus forte en stock qu'en surface

La transition forestière française est datée du XIX^{ème} siècle (Mather, 1999 ; Meyfroidt et Lambin, 2011). Depuis, la surface forestière des forêts est en augmentation (Cinotti, 1996 ; Denardou *et al.*, 2017 ; **Figure 6.3**). **Sur 100 ans, la forêt française a vu sa surface augmenter de 50% (i.e. 5,1 millions d'hectares ; voir partie III).**

Une estimation du stock de bois à la fin du XIX^{ème} siècle - début du XX^{ème} siècle a permis d'estimer celui-ci à **environ 630 millions de m³ en 1892 et 940 millions de m³ en 1929 (voir chapitre IV ; Figure 6.3)**. Il aurait donc augmenté de façon largement plus soutenue que les surfaces forestières. **Alors que la surface forestière française a augmenté de 58% entre 1892 et 2010 (voir chapitre II), le stock sur pied aurait augmenté de 300% entre 1892 et 2010 (voir partie V), c'est-à-dire cinq fois plus vite.** Ces rythmes relatifs d'expansion en surface et en stock sont très proches de ceux estimés en Suisse entre 1860 et 2006 (+292% pour le stock de bois et +63% pour la surface forestière entre 1860 et 2006 ; Usbeck *et al.*, 2010).

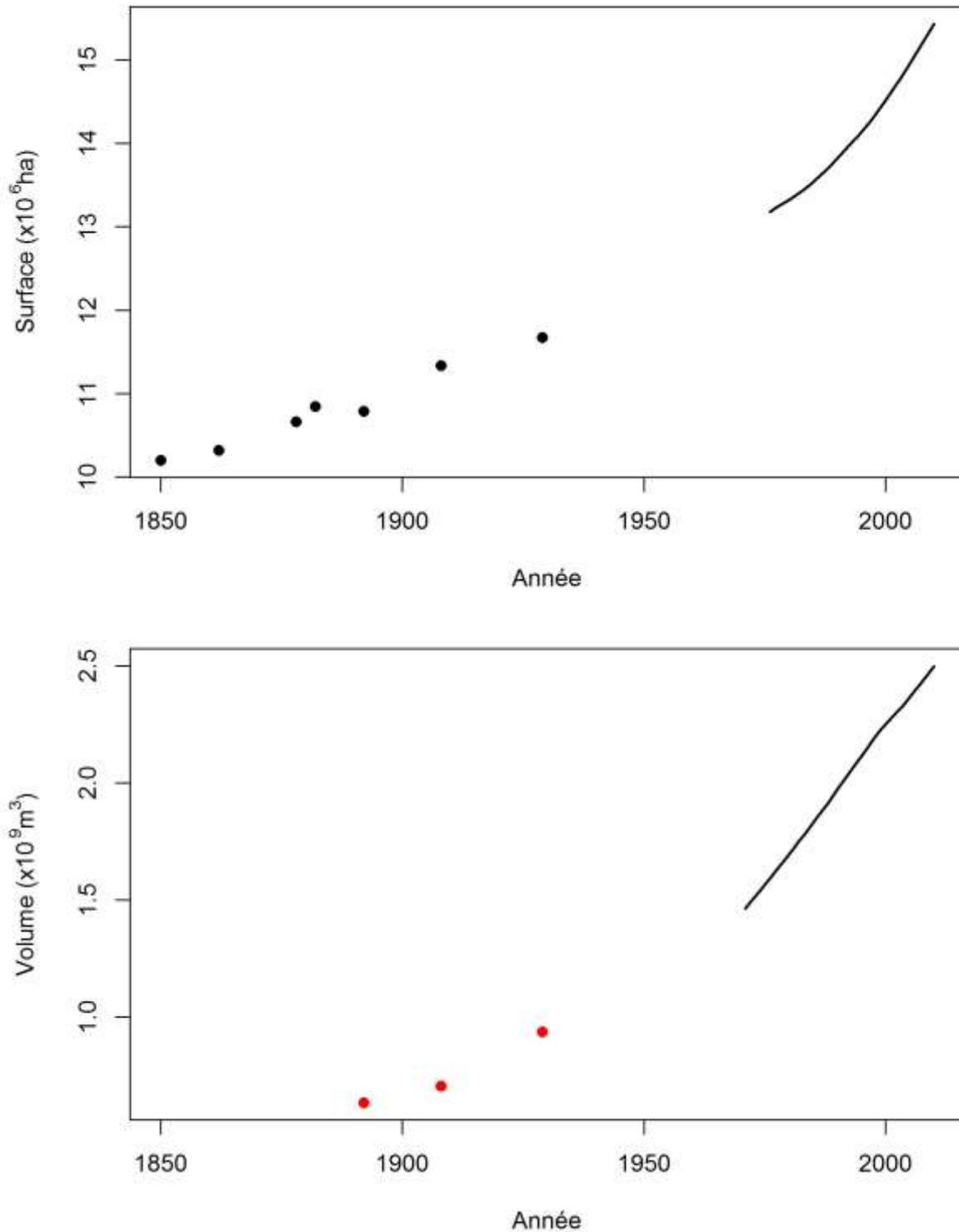


Figure 6.3. Evolution de la surface et du stock sur pied des forêts françaises depuis 1850. La ligne représente les résultats de l'interpolation des données IFN entre 1976 et 2010. Les points noirs sont des données provenant de statistiques anciennes (voir partie V – 3.2.1). Les points rouges sont les estimations du stock en 1892, 1908 et 1929.

La forêt française était vraisemblablement peu capitalisée en 1850 (25 m³/ha) et au début du XX^{ème} siècle (65 m³/ha en 1892). Ce dernier chiffre correspond à la densité des taillis actuels (66 m³/ha en 2010 ; données IFN). Elle a vu sa densité augmenter fortement entre 1892 et 2010 (+ 97 m³/ha ; voir partie V – 3.4.2). La densité du stock de bois français (170 m³/ha en 2015 ; données IFN) reste cependant faible comparée à celle d'autres pays européens, comme l'Allemagne (320,8 m³/ha en 2015 ; Forest Europe, 2015 ; **Figure 6.4**). Il est souvent avancé que cette faiblesse relative du stock serait due au fait que la France contient une part importante de forêts méditerranéennes et de haute montagne, à faible niveau de stock moyen. Et c'est bien ce que suggère la **Figure 6.4**, avec une position intermédiaire de la France, en densité de stock, entre pays méditerranéens ou scandinaves, et pays de plaine et d'Europe centrale. Mais une analyse plus fine de la répartition des stocks en France montre que ce n'est pas la seule explication. La région de France au plus fort stock à l'hectare, Bourgogne-Franche-Comté (217 m³/ha, moyenne des données IFN 2011-2015), ou la région Grand-Est, juste derrière (212 m³/ha), présentent des contextes bioclimatiques et géologiques très semblables aux pays européens qui dépassent 300 m³/ha. La valeur maximale possible des stocks à l'hectare en France est donc probablement encore loin des valeurs actuellement observées.

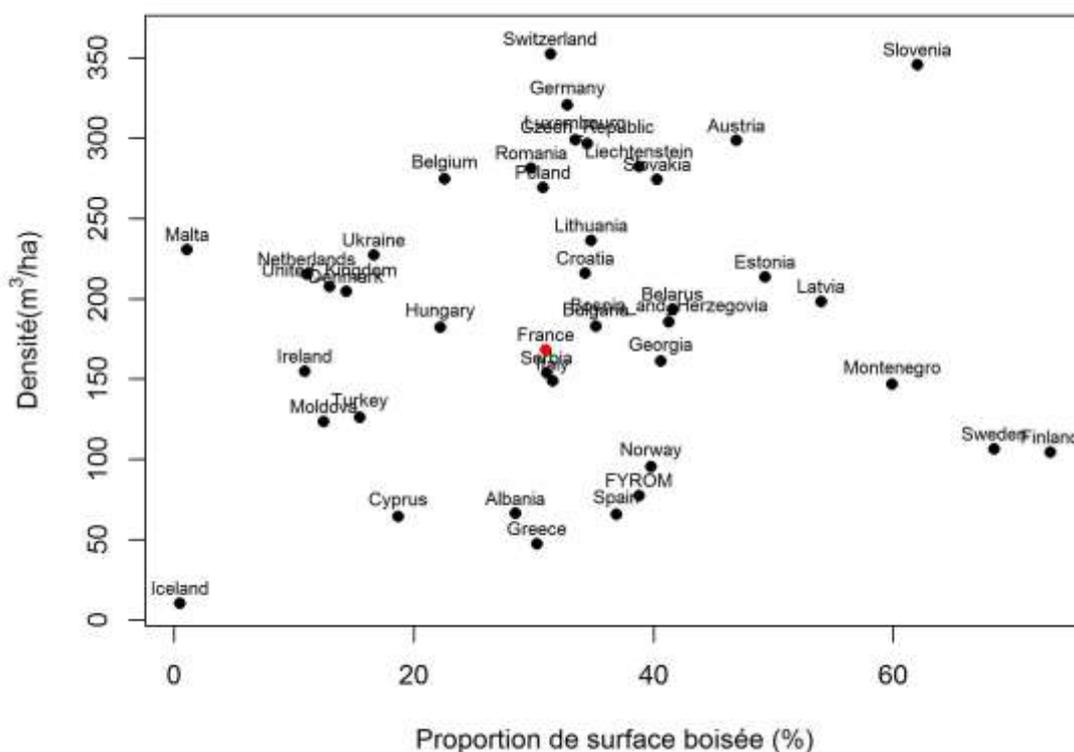


Figure 6.4. Densité en stock sur pied selon le taux de surface boisée des pays européens (source : Forest Europe, 2015)

Nos résultats ont montré que les erreurs minimales des modèles sont obtenues grâce aux stocks des statistiques anciennes reconstitués à partir des quantiles de 30 et 40% plutôt que des moyennes des valeurs de stock à l’hectare observées au début de l’IFN et montrent que **cette densification n’est pas uniquement le fruit d’un changement de structure de la forêt française (conversion de taillis) mais bien d’une densification généralisée (Figure 5.3 ; Tableau 5.4).**

L’augmentation, plus rapide en stock qu’en surface, indique que la forêt française est dans un stade avancé de l’expansion, où le stock a déjà eu le temps de capitaliser, et à une vitesse importante. Une phase plus précoce de l’expansion est illustrée par les forêts vietnamiennes qui présentent une augmentation de leur surface forestière alors que leur densité de stock sur pied diminue (Kauppi *et al.*, 2006 ; FAO, 2015).

L’augmentation du stock sur pied des forêts françaises en seulement 35 ans (entre 1975 et 2010) correspond à la totalité du stock sur pied des forêts de production espagnoles (944 millions de m³ ; Forest Europe, 2015). Ce résultat souligne l’importance de l’étude de l’expansion du stock sur pied permettant de comprendre à la fois la nature de ces nouvelles forêts, les causes de ces changements et leur dynamique. Dans un contexte de changement climatique et de mise en place de stratégies de bio-économie, l’inventaire forestier se présente alors comme un outil indispensable permettant le suivi annuel de ces changements.

3.2 Une expansion hétérogène dominée par les forêts privées

L’étude de l’expansion forestière a été effectuée en utilisant plusieurs facteurs de partition : la géographie (département/GRECO), le type de propriété et la composition. Ces facteurs montrent une forte hétérogénéité de l’expansion.

Alors que la transition forestière est un phénomène défini, à l’origine, à l’échelle d’un pays (Mather, 1992 ; Mather, 1999), nos résultats ont montré que les expansions en surface et en stock présentaient des hétérogénéités spatiales (Denardou *et al.*, 2017), comme il a déjà été observé pour les surfaces dans divers pays (en Suisse par Loran *et al.*, 2016 ; en Norvège par Fjellstad et Dramstad, 1999 ; aux Etats-Unis, avec la mise en évidence d’un gradient Est-Ouest par Kauppi *et al.*, 2006). Ces hétérogénéités sont l’empreinte des multiples facteurs de l’expansion.

Entre 1976 et 2010, l’expansion en surface était principalement localisée dans le Sud-Est et en Bretagne (Denardou *et al.*, 2017). Ces deux zones correspondent à des zones privilégiées de la déprise agricole (Chakir et Madignier, 2006 ; Renwick *et al.*, 2013). Après leur abandon, les terres se retrouvent boisées soit par plantation soit par accrus naturels, premier facteur de l’expansion forestière (voir partie I). Pendant la même période, les augmentations de stock sur pied étaient, elles, plus fortes dans le Massif Central. Or, entre 1908 et 1975, c’est dans le Massif Central que l’expansion en surface dominait. Cela semble lié aux plantations effectuées dans cette région, et principalement les plantations du FFN (+800 000 hectares ; Dodane, 2009) dont le Massif Central était une des zones privilégiées

(Betolaud, 1972). **Ce qui est donc observé actuellement dans le Massif Central est la maturation des plantations effectuées précédemment. Ce délai entre l'augmentation de stock et celle de surface a été mis en évidence de façon statistique** (voir partie modélisation de l'article 2). Le Massif Central continue à être marqué par cette période de fortes plantations. En effet, c'est dans cette GRECO que le nombre d'essences dominantes identifiées est le plus élevé (11 essences dominantes identifiées ; **Tableau 3.2**).

Une diminution du stock sur pied entre 1976 et 2010 a été observée dans trois départements : la Gironde (33), le département des Landes (40) et la Meurthe-et-Moselle (54 ; voir article 2). Cette diminution est associée aux tempêtes de 1999 et 2009 qui ont détruit respectivement 138,5 millions de m³ (Ministère de l'agriculture, 2006) et 43,3 millions de m³ (IFN, 2009), principalement localisés dans le Sud-Ouest et le Nord-Est de la France.

L'expansion en surface et en stock sur pied est principalement localisée dans les forêts privées (voir partie III). Alors que les changements relatifs de surface sont similaires pour les forêts communales et les forêts privées, ces dernières connaissent une augmentation de leur stock beaucoup plus rapide. A l'opposé, les forêts domaniales, historiquement plus intensément gérées, mais aussi mises en valeur par des stocks sur pied à l'hectare bien supérieurs, présentent les plus faibles changements de surface et de stock et ne sont donc que très peu concernées par les problématiques liées à l'expansion. Ceci est illustré par les analyses conduites sur la dynamique de ces forêts (voir partie IV) : quel que soit le niveau d'analyse retenu (GRECO x propriété, et avec les essences), les forêts domaniales apparaissent comme des compartiments ayant un rôle insignifiant voire négatif dans l'expansion des forêts (**Tableaux 4.12 et 4.14 ; Figure 4.41**). L'expansion en surface des forêts privées est liée à l'abandon des terres agricoles, phénomène observé dans toute l'Europe (Lasanta *et al.*, 2017; Keenleyside *et al.*, 2010).

Les forêts privées, qui sont les moins denses (100 m³/ha en 1976), ont connu la plus forte densification. Leur faible densité peut être liée à la fois à la part importante de taillis-sous-futaie dans ces forêts (43% de la surface contre 31% en forêt communale et 20% dans les domaniales, aujourd'hui, chiffres IFN) et à l'expansion forte des surfaces, impliquant une phase, peu dense, de mise en place de la forêt. Cependant, la différence entre les densités des différents types de propriétés tend à diminuer, confirmant les observations de Pignard (2000). Ici encore, la partie IV a permis de préciser ces constats. De façon remarquable, 40% de l'expansion en stock de bois décrite (*i.e.* 80% de l'expansion totale ; voir partie IV – 3.4) des forêts françaises se situe dans les strates de la forêt formées par les chênes en plaine, les chênes et le hêtre en moyenne et haute montagne, et les espèces de taillis (châtaignier, bouleau, charme) présentes dans les divers feuillus (**Figure 4.41**). A l'évidence, c'est dans cette série de faciès qu'on peut lire l'effet de la maturation des taillis d'essences feuillues (**Figure 4.41 ; Tableau 4.14**)

Parmi les types de composition, les forêts privées feuillues présentent les plus fortes expansions en surface et en stock (voir partie III ; articles 1 et 2), traduisant une expansion

dominée par les boisements naturels. Cependant, **la proportion de surface de forêts feuillues et résineuses, telle qu’appréciée avec la statistique Daubrée et les données d’inventaire actuelles, n’a pas évolué depuis le début du siècle avec un ratio constant de 2/3 de forêts feuillues.** Bien que l’expansion en stock de bois des forêts privées soit dominée par les feuillus, les résineux présentent la même intensité d’expansion en stock sur pied (IE = 1,2) et une augmentation relative semblable (+13,2% contre +12,7% pour les feuillus) traduisant la forte capitalisation de ces forêts. Il est intéressant de constater que la perception générale des usagers de la forêt est plus celle d’un enrésinement progressif et assez général. En fait, s’il y a bien eu enrésinement important de certaines strates de la forêt française (Denardou *et al.*, 2017), il est compensé par la progression des feuillus dans d’autres strates, correspondant le plus souvent à d’autres zones géographiques. Cette progression feuillue est moins facilement perçue.

L’importance de la déprise agricole dans l’expansion forestière a de multiples conséquences. Tout d’abord, celles concernant la gestion des nouvelles forêts (de Galbert *et al.*, 2015). En effet, l’augmentation spontanée des forêts est liée directement aux problématiques du morcellement de la propriété privée et de la non-gestion de ces forêts. Se développant sur d’anciens terroirs agricoles avec un parcellaire parfois très morcelé, les forêts nouvelles contribuent au morcellement de la propriété privée des forêts françaises, et à la difficulté de leur gestion. Mais il y a aussi les conséquences sur les trajectoires dynamiques de ces nouvelles forêts. Les sols anciennement anthropisés ne présentent pas les mêmes qualités et la même fertilité (Koerner *et al.*, 1997 et 1999) que les sols anciennement forestiers, entraînant une dynamique différente de ces forêts comparées aux forêts anciennes et pouvant expliquer en partie les fortes croissances observées dans les forêts privées (**Figure 4.26**) et la corrélation positive entre croissance et variation de surface (corrélation de 0,30 ; **Tableau 4.8**).

3.3 Des dynamiques d’expansion multiples

L’analyse de la dynamique de l’expansion a montré que l’intensité d’expansion est de façon très générale attribuable à des niveaux de prélèvements en deçà des niveaux d’accroissement biologiques, et qu’elle est renforcée par des niveaux élevés de croissance et de recrutement pour des ensembles forestiers jeunes et plantés.

Notre étude s’est focalisée sur 95% de l’expansion au niveau 1 et 80% au niveau 2 (voir partie IV – 3.4).

Au niveau 2, il a été possible d’identifier quatre groupes de facies dynamiques contribuant à l’expansion décrite :

- Les résineux des forêts privées (exemple du Douglas dans les forêts privées du Massif Central) à forte croissance et faible prélèvement (**Tableau 3.16**) dont l’intensité d’expansion est très élevée. Ces accroissements de stock sont la conséquence des

politiques de plantations. L'utilisation d'essences à forte croissance (Pourtet, 1972) et la plantation des arbres sur des sols anciennement agricoles (Koerner *et al.*, 1999) expliquent la forte croissance observée et permettent de comprendre les mécanismes sous-jacents à la capitalisation plus importante des résineux que des feuillus observée dans les forêts privées (Denardou *et al.*, 2017). Les forêts privées de la GRECO GO connaissent une expansion plus récente de surface que celle des forêts du Massif Central, dont l'expansion a été très forte lors de la première partie de la période du FFN (1946-1999 ; partie I – 1.3.4 ; **Figure 1.4**).

- Des stocks de forêts de haute et moyenne montagne. Contrairement aux résineux des forêts privées précédemment présentés, ces forêts, aux profils diamétriques plus matures, présentent des croissances assez faibles. L'exploitation de ces forêts est difficile à cause des conditions de terrain (fortes pentes, présence d'obstacles, etc. ; Constantin et Vanterin, 1998 ; IGN, 2012).
- Des feuillus sociaux de plaine et moyenne montagne, liés aux taillis en maturation. Ce groupe représente à lui seul 2/5 de l'expansion décrite.
- Les stocks des forêts, essentiellement privées, gérées de tradition forestière ancienne localisées dans le Nord-Est et le Sud-Ouest de la France.

Les stocks du premier groupe, présentant une forte croissance, sont plutôt liés à des strates dont l'expansion en surface est importante alors que ceux des trois autres groupes, présentant de faibles croissances, correspondent plutôt à des stocks en maturation stagnants du point de vue de la surface.

Les stocks de bois feuillus en forêt publique, contrairement aux résineux des forêts privées, présentent des flux de croissance faible et de forts prélèvements. Ainsi, ces forêts, et principalement les forêts domaniales, présentent une intensité d'expansion inférieure à 1 (*i.e.* une baisse de leur part dans la surface terrière totale) voire une décapitalisation. Cependant, il faut remarquer que ces forêts présentent des profils diamétriques assez matures, expliquant la gestion plus intensive observée dans ces strates.

Les flux de mortalité se sont montrés être relativement faibles par rapport aux autres flux dans toutes nos strates étudiées (Annexe IV.6). Cependant, le châtaignier se distingue des autres essences pour sa mortalité plus élevée, entraînant une diminution de la part que représente cette essence dans la surface forestière totale (Tableau 3.16). Ces fortes mortalités sont vraisemblablement dues à la maladie de l'encre, arrivée au XVIII^{ème} siècle en Europe (Vannini et Vettraino, 2001).

Sur un horizon de 100 ans, les taux de prélèvement de bois d'œuvre et d'industrie ont diminué dans la forêt française, à toute période où ils ont pu être analysés de façon homogène, et bien qu'un tableau historique d'ensemble ne soit pas aisément consolidable (**Figure 5.22**). Ces

observations corroborent l'idée que le niveau de prélèvements est un facteur historique d'évolution du stock de bois sur pied.

Les prélèvements par hectare ont diminué entre 1892 et 1929 mais ceux-ci sont assez stables au moins depuis 1980 (autour de 2,80 à 2,90 m³/ha/an ; **Figure 6.5**). De plus, tout récemment (depuis 2007 ; Partie V - 5), les taux de prélèvements semblent s'être intensifiés (**Figure 5.22**). Sur cette même période une expansion du stock sur pied est constatée (voir articles 1 et 2), et donc le puits de carbone forestier a été positif. **Ce résultat indique que lorsque les prélèvements de bois restent en deçà de l'accroissement biologique, ces derniers peuvent être augmentés tout en restant compatibles avec une augmentation du stock de bois. Il existe donc en pratique une marge d'intensification des prélèvements de bois compatible avec un maintien voire une augmentation de stock de bois dans les forêts.** Ce phénomène de prélèvements en deçà de la croissance est quasi-général en Europe (Forest Europe, 2015 ; **Figure 6.6**). Ainsi, l'intensification des prélèvements de bois votée par le parlement européen (Renewable Energy Directive¹²) dans l'optique d'augmenter l'utilisation des énergies renouvelable n'est pas nécessairement une menace au maintien voire à une augmentation du stock de carbone en forêt, dès lors que son niveau quantitatif est raisonné par rapport à l'expansion des forêts. Ce résultat amène à nuancer l'argument schématique qui oppose qualitativement prélèvements de bois et maintien du stock de bois (voir Searchinger *et al.*, 2018 et la lettre de chercheurs au parlement européen Beddington *et al.*, 2018 qui critiquent la mise en place d'une directive d'intensification des prélèvements de bois énergie).

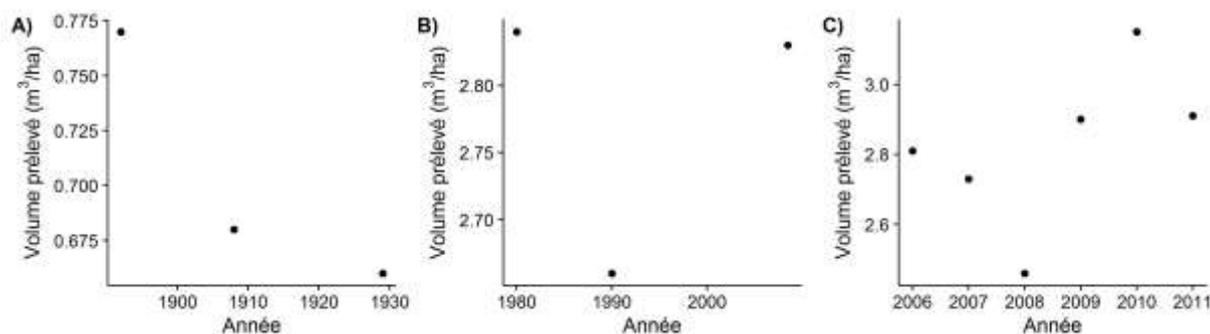


Figure 6.5. Volume bois d'œuvre et d'industrie prélevé par hectare selon A) les statistiques anciennes (statistiques agricoles de 1892 et 1929 et statistique Daubrée de 1908) et B) et C) les données de l'inventaire forestier national. Sur la figure B, la donnée de 2008 est une moyenne des prélèvements entre 2006 et 2010 et celle de 1980 est évalué sur seulement 53 départements. La droite rouge est la régression linéaire des prélèvements annuels entre 2006 et 2011.

¹² <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive>

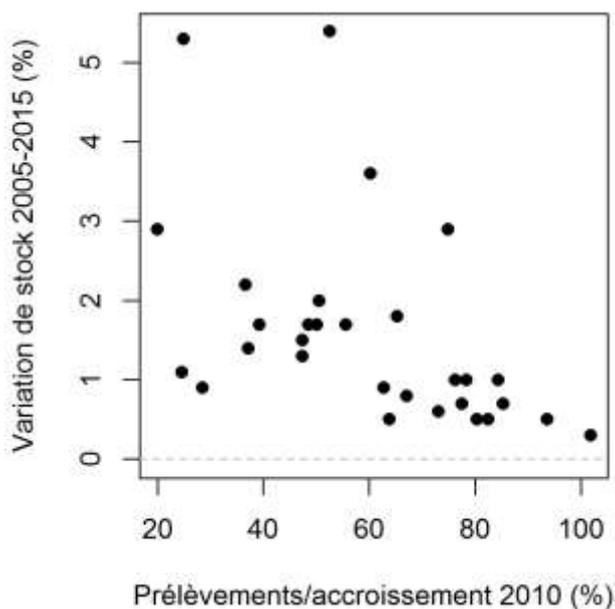


Figure 6.6. Variation de stock entre 2005 et 2015 en fonction de l'intensité de gestion (prélèvement/accroissement) en 2010 en Europe (hors Albanie ; Source : Forest Europe, 2015). La ligne tiretée représente une expansion de stock nulle.

L'analyse de la dynamique de l'expansion a montré qu'aucune strate ne correspondant à une absence de gestion, au grain où elles ont été définies. Pour satisfaire les directives visant à augmenter les prélèvements, la problématique française doit donc se porter sur la façon d'intensifier les prélèvements. Dans les quatre groupes précédemment identifiés, on peut remarquer que les résineux de forêts privées (premier groupe) et les feuillus de taillis en maturation correspondent à des stocks jeunes. Bien que les premiers peuplements FFN arrivent à maturation, une partie de ce stock n'est pas encore mobilisable. Les forêts de montagne sont difficiles d'accès et les contraintes physiques du milieu rendent ces stocks difficilement prélevables. La mise en place de modèles d'estimation de l'accessibilité de la ressource forestière permettrait de mieux choisir le système d'exploitabilité en fonction des contraintes du terrain et ainsi de faciliter les prélèvements dans les zones principalement montagnardes (Dupire *et al.*, 2015). L'intensification peut essentiellement se concentrer sur les forêts privées gérées dont les prélèvements restent plus faibles que la croissance, expliquant leur expansion importante (1/5 de l'expansion décrite ; **Figure 4.43**). Toutefois, les profils diamétriques de ce groupe, moins matures que ceux des forêts publiques, montrent que le choix de ne pas prélever l'intégralité de l'accroissement biologique est cohérent avec une optique d'accroissement de la valeur du capital. Dans le contexte actuel, il n'est donc pas possible d'égaliser prélèvement et croissance dans les forêts françaises. **Ces éléments**

suggèrent qu'un raisonnement global fondé sur le taux de prélèvement moyen des forêts et son augmentation potentielle est simpliste, et doit être dépassé.

3.4 Une expansion séculaire qui a accéléré dans le temps et qui ne présente pas de saturation

L'étude des changements de surface forestière depuis 1908 a montré que l'expansion en surface des forêts française a connu une augmentation de vitesse (+42 000 ha/an entre 1908 et 1975 contre +66 000 ha/an entre 1975 et 2010 ; Denardou *et al.*, 2017).

De plus, nos simulations ont montré que, **de la même façon que pour les surfaces, l'expansion en stock aurait été moins rapide au début de la période (Figure 5.1)** avec une capitalisation lente des peuplements déjà présents. Etonnement, **les modèles de capitalisation permettant la meilleure retranscription de l'évolution passée du stock sur pied ne sont pas les modèles classiques, concaves, de croissance des peuplements mais des modèles convexes (première phase du modèle sigmoïde de Hossfeld), soulignant la forte densification de la forêt française depuis 1850.** Entre 1908 et 1976, le rythme d'augmentation des stocks était de 13,0 millions de m³/an alors qu'entre 1976 et 2010 il était de 26,6 millions de m³/an, c'est-à-dire deux fois plus rapide. Ainsi, **la maturation des forêts anciennes semble plus lente que celle des forêts récentes**, pouvant être expliqué par plusieurs causes comme la mise en place des nouvelles forêts sur des sols anciennement agricoles et donc souvent plus fertiles (Koerner *et al.*, 1999) ou la plantation d'espèces à croissance rapide (Douglas, Epicéa de Sitka, Epicéa commun, Sapin pectiné). Une explication supplémentaire, dans les recolonisations naturelles, peut être un arrêt plus brutal des activités agricoles dans les territoires abandonnés aujourd'hui que par le passé, avec une baisse toute particulière des usages des terres en cours d'abandon. L'un des modes de valorisation de ce saltus dans le passé était l'élevage extensif ovin. Il était en effet de pratique courante de continuer à faire pâturer les terrains abandonnés, parfois pendant des dizaines d'années. Or, ce type de valorisation a fortement diminué. Rappelons que le cheptel ovin était de plus de 33 millions de têtes en 1852 (Rieutort, 1995), contre 7 millions environ aujourd'hui (données Agreste¹³), sans parler du cheptel caprin, qui jouait de façon encore plus marquée ce rôle de frein au développement de la forêt.

Sur la période couverte par l'IFN, **aucun signe de ralentissement de l'expansion en surface et en stock n'est observé** (article 2), contrairement aux résultats obtenus pour la surface par Cinotti (1996) à partir des données de diverses sources, dont le cadastre et l'enquête ministérielle « Teruti ». **Les forêts privées et les forêts feuillues privées ont même montré une accélération de l'expansion de leur stock sur pied.** Dans les forêts privées, une accélération de l'expansion en surface a également été observée. De plus, nos modèles statistiques ont montré l'effet positif et important du stock initial et de l'augmentation passée des surfaces sur les changements de stock des forêts (article 2). **La forêt française qui**

¹³ <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/saa2018T10bspca.pdf>

constitue un puits de carbone important (deuxième stock de carbone de l'UE-27 en 1990 ; Karjalainen *et al.*, 2003) **devrait donc voir ce puits encore fortement augmenter**. Cependant, un effet, plus faible mais récent, de la densité de stock est observé et pourrait, à long terme, entraîner un ralentissement, voir un arrêt de l'expansion. Mais le faible stock des forêts françaises comparé à celui des pays voisins, même dans des régions bioclimatiques similaires, laisse penser que cet arrêt ne devrait pas être imminent. Par ailleurs, il n'existe pas de corrélation entre expansion du stock et densité du stock au niveau européen (Forest Europe, 2015). Nos essais de reconstitution de l'évolution du stock sur pied depuis 1850 montrent que les meilleures simulations sont obtenues avec des modèles dont la densité maximale est élevée (400 ou 500 m³/ha en général), appuyant notre constat de non saturation ainsi que le potentiel d'expansion futur.

3.5 L'expansion forestière en France et dans le monde

Alors que la surface forestière mondiale est en diminution depuis 1990 (FAO, 2015 ; Keenan *et al.*, 2015), celle du continent européen présente à la fois une augmentation de surface et de stock sur pied. La forêt constitue un large puits de carbone (Pan *et al.*, 2011). Bien que le phénomène de transition forestière ne soit observé actuellement qu'au niveau des pays développés, la généralisation potentielle de ce phénomène au niveau planétaire serait possible dans moins de 70 ans (Pagnutti *et al.*, 2013). Dans le contexte actuel de changement climatique, comprendre l'origine et les mécanismes de la transition et de l'expansion forestière s'avère donc d'importance capitale afin de gérer la ressource de manière durable d'un point de vue social, économique et écologique (« forest principles »¹⁴ ; United Nations conference on environment and development, 1992).

Nous avons vu que l'expansion en surface des forêts françaises est principalement spontanée (**Figure 1.7**). Cela est à mettre en lien avec la diminution de la main d'œuvre agricole observée en général en Europe (Rudel *et al.*, 2005). En Asie du Sud et de l'Est, l'expansion est principalement due à un manque de ressources forestières qui a conduit à l'initiation de programmes de boisements. Cette deuxième cause d'expansion fait écho aux politiques de plantations (FFN et RTM) qui ont été initiées plus tôt (au XIX^{ème} et XX^{ème} siècle) en France afin de reconstruire les forêts françaises (de Vaissière, 1952 ; Combes, 1989).

Nos résultats montrent que la surface forestière française ne présente pas encore de saturation. De plus, la part de la surface boisée française est faible par rapport aux autres pays européens (**Figure 1.8**). Ainsi, elle devrait continuer à augmenter dans les prochaines décennies. Dans l'Est des Etats-Unis, un maximum d'expansion aurait déjà été atteint dans les années 70 (Drummond et Loveland, 2010), en lien avec l'expansion de l'urbanisation qui freinerait maintenant l'expansion des forêts. L'artificialisation du territoire est un phénomène qui touche l'ensemble de l'Europe (Laroche *et al.*, 2006). En France, l'augmentation des espaces

¹⁴ "Forest resources and forest lands should be sustainably managed to meet the social, economic, ecological, cultural and spiritual needs of present and future generations."

naturels et des espaces artificialisés se fait pour l'instant au détriment des sols agricoles (Enquête Teruti-Lucas 2014¹⁵). **Dans un futur lointain, une confrontation entre l'expansion des forêts et l'artificialisation des sols pourrait intervenir. Il serait alors possible que ce phénomène de diminution de surface forestière puisse être observé également en France. Cependant, le taux de boisement français est encore faible et il est peu probable que ce phénomène soit observé avant, au moins, plusieurs décennies.**

Alors que l'expansion forestière touche un nombre important de pays et que les informations sur les changements de surface forestière sont assez riches, peu d'études s'intéressent aux changements de stocks sur pied sur le long terme. On peut cependant citer certains travaux en Finlande (Henttonen *et al.*, 2017), pays qui a l'avantage d'avoir un inventaire national mis en place très tôt (1921), et en Suisse (Usbeck *et al.*, 2010) où un modèle a été utilisé afin de reconstituer le stock sur pied en 1860.

La France présente l'augmentation de stock forestier la plus importante d'Europe (Forest Europe, 2015). Cela peut s'expliquer à la fois par sa forte expansion en surface (également la plus forte d'Europe) mais aussi, et surtout, par la part importante de son stock en maturation. Ce stock est constitué à la fois de forêts montagnardes, difficilement récoltables, et de forêts jeunes (issues de plantations, d'abandons ou de conversion).

3.6 Le futur de l'expansion forestière

Nous avons montré que l'expansion ne présente pas de saturation en surface et en stock. De plus, l'effet positif du stock initial et de l'augmentation passée des surfaces laisse penser que l'expansion en stock devrait continuer encore plusieurs décennies. Nous avons utilisé le modèle sigmoïde de Hossfeld présentant la meilleure RMSEP (modèle unique pour les forêts anciennes et nouvelles ; **Tableau 5.4**) avec une hypothèse conservatrice, en considérant qu'à partir de 2010, la surface forestière n'évoluerait plus. La simulation a permis d'estimer le stock maximal de la forêt française à 6 milliards de m³ (*i.e.* plus de 2 fois le stock de bois français actuel), ce qui correspond à une densité de 389 m³/ha (pour comparaison, la densité de la forêt allemande était de 321 m³/ha en 2015 ; Forest Europe, 2015). **Sous ces hypothèses de simulation conservatrices (l'accumulation de stock ralentit, les surfaces n'augmentent plus), ce stock considérable est atteint au XXIV^{ème} siècle (Figure 6.7). Il souligne les temps caractéristiques de ces phénomènes, ainsi que le potentiel de séquestration de carbone existant.**

¹⁵ Données disponibles sur <http://agreste.agriculture.gouv.fr>

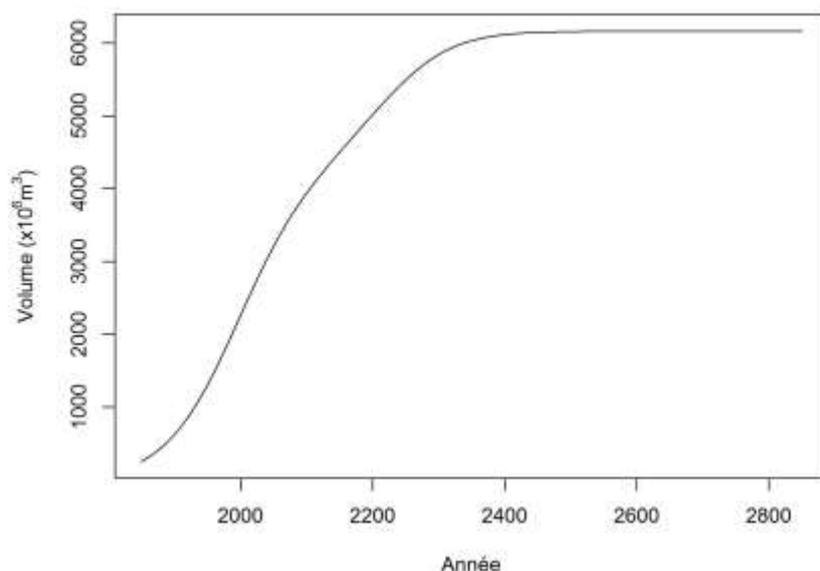


Figure 6.7. Projection temporelle du stock de bois forestier simulé à partir du modèle de densification présentant l'erreur d'ajustement la plus faible sur les données historiques de stock estimés en 1892, 1908 et 1929 (Figure 5.19 ; Talbeau 5.4) et une surface forestière stable depuis 2010.

Il n'est pas certain cependant, vu la proportion de surface boisée moyenne du territoire (31% ; **Figure 1.8**) que la surface se stabilise. L'enquête « Teruti Lucas » 2014¹⁶ nous renseigne sur l'occupation du sol en 2014. Sur les 10 catégories d'occupation, seules 3 semblent pouvoir devenir des terres boisées (sols cultivés, surfaces toujours en herbe et landes). Si l'on considère, à titre d'exemple, qu'encore 30% de ces sols peuvent se boiser, on aboutit à une surface maximum de 25 millions d'hectares. Cette surface correspondrait à une occupation de 45% du territoire, ce qui reste comparable à d'autres pays européens (par exemple 47% en Autriche). En considérant que la densité à l'hectare maximum est de 389 m³/ha on peut estimer un stock maximum théorique à 9 milliards de m³ (*i.e.* plus de 3 fois le stock de bois français actuel).

L'étude des profils diamétriques des forêts a montré que les forêts présentant les plus fortes intensités d'expansion présentaient aussi les profils diamétriques les plus jeunes (Tableau 4.17). Ces peuplements, issus de plantations, et dont la part dans la surface terrière initiale est assez faible (0,57, 0,19 et 1,74% de la surface terrière initiale pour les facies 1, 2 et 3 respectivement) devraient donc voir leur part augmenter fortement. Un deuxième groupe de facies présente une intensité d'expansion supérieure à 1, il s'agit de forêts assez matures et peu gérées. Si ces forêts ne sont pas exploitées davantage, leur expansion devrait diminuer, en

¹⁶ Disponible sur le site agreste.agriculture.gouv.fr

lien avec l'effet négatif de la densité sur le changement de stock (très faible, pour l'instant dans nos modèles, mais en augmentation ; article 2) et la faible expansion en surface de ces forêts.

Le changement climatique a un impact sur la productivité des forêts (Boisvenue et Running, 2006 ; Charru *et al.*, 2017) et pourrait accélérer le processus d'expansion du stock. Cependant, un lien est aussi observé avec la mortalité (Allen *et al.*, 2010).

Une récente expertise collective INRA-IGN (Roux *et al.*, 2017) envisage plusieurs scénarios de gestion pour la forêt française dont un d'« intensification et augmentation des prélèvements, simulés par un plan de reboisement actif » qui considère un reboisement (*i.e.* plantations sur des sols déjà boisés) de 500 000 ha sur 10 ans. Cela correspond à 0,3% de la surface forestière actuelle et à la moitié des reboisements qui ont été effectués par le FFN entre 1946 et 1999. Un tel reboisement, même avec des essences à forte croissance, ne devrait donc pas avoir un impact important sur l'expansion de stock.

Il serait aussi possible que, dans un futur lointain, l'expansion urbaine commence à entrer en concurrence avec l'expansion forestière, comme cela est déjà observé dans l'Est des Etats-Unis (Drummond et Loveland, 2010). Cependant, ce phénomène est observé dans cette région pour un pourcentage de surface boisée beaucoup plus élevé que celui de la France (supérieur à 50%) et laisse donc penser que les forêts françaises ont encore une marge d'expansion conséquente.

4 Conclusions et perspectives

4.1 Principales conclusions

La compréhension de l'expansion ne peut se faire qu'à partir d'une analyse sur des temps longs, correspondant au pas de temps forestier. **Notre estimation du stock sur pied au début du XX^{ème} siècle a permis de pallier le manque d'information ancienne le concernant et ainsi de pouvoir étudier son évolution, en parallèle à celle des surfaces, sur le long terme.** L'expansion forestière est forte depuis 1850 avec une **expansion plus rapide en stock qu'en surface, montrant que la forêt française est déjà dans une phase avancée de l'expansion.** Alors que le rythme d'expansion en surface et en stock a augmenté sur la période, **aucune saturation n'est pour l'instant observée.** La forte expansion en surface, le délai entre expansion en surface et expansion en stock et l'effet positif du stock initial sur le changement de stock montrent que **l'augmentation du stock sur pied devrait continuer encore plusieurs décennies, constituant ainsi un large puits de carbone.** L'étude de l'expansion et, plus particulièrement, celle de l'expansion du stock constituent donc un enjeu majeur dans le contexte actuel de changement climatique. **L'apparition à un rythme soutenu de ce nouveau stock doit être prise en compte dans l'élaboration de politiques de gestion durable des forêts.**

L'expansion en surface et en stock a montré une forte hétérogénéité selon les facteurs étudiés (géographie, propriété et composition). Les forêts privées, et principalement les forêts privées feuillues, présentent l'augmentation de surface la plus importante, signe de la **nature principalement spontanée de l'expansion en surface**, majoritairement localisée actuellement en Bretagne et dans le Sud-Est de la France. Cependant, au niveau national, la part relative en surface des forêts feuillues et résineuses n'a pas évolué depuis 1908. Avant 1976, l'expansion en surface était principalement localisée dans le Massif Central et résulte en grande partie des plantations du FFN.

L'étude de la dynamique de l'expansion a montré que **l'expansion en stock est principalement dirigée par la croissance et les prélèvements**. Quatre groupes de facies, principalement constitués de stocks de forêts privées, expliquent l'augmentation du stock : des résineux en expansion de surface (jeunes plantations ; 1/5 de l'expansion), des stocks en maturation (forêts montagnardes et feuillus sociaux de plaine et moyenne montagne ; respectivement 1/5 et 2/5 de l'expansion) et des stocks de forêts privées gérées mais dont les prélèvements restent plus faibles que la croissance (1/5 de l'expansion). **L'expansion en stock semble donc principalement expliquée par une maturation des peuplements**.

Bien que l'ensemble de la forêt semble avoir connu une densification, nos modèles ont montré que **les forêts déjà présentes en 1850 (dites forêts anciennes) semblent avoir présenté une densification plus lente que les forêts implantées depuis**. La modélisation de l'expansion en stock ne peut donc se faire qu'en utilisant des modèles de densification différents pour les deux types de forêts.

4.2 Perspectives de recherche

4.2.1 Différenciation des forêts privées gérées

Les forêts communales, bien que correspondant seulement aux forêts soumises, ont une dynamique assez proche de celle des forêts privées (**Tableau 4.14**). Ces forêts semblent donc se comporter de façon relativement intermédiaire entre les forêts domaniales et les forêts privées, expliquant leur forte capitalisation (articles 1 et 2). Cependant, les forêts privées regroupent à la fois des forêts privées gérées et non gérées (par choix ou par abandon du terrain). Il serait intéressant de pouvoir séparer ces deux derniers types et de comparer les forêts privées gérées aux forêts publiques afin de mieux déterminer l'effet de la gestion sur l'expansion.

La séparation exacte des forêts privées gérées de celles non gérées ne semble pas possible mais la donnée spatialisée des forêts privées ayant un plan simple de gestion (PSG) apporterait déjà une première idée des forêts potentiellement gérées. Cette donnée est disponible sur les dernières années d'inventaire seulement. Si l'on considère que la localisation des forêts privées sous PSG n'a pas beaucoup évolué, il serait possible, en utilisant les coordonnées des points d'inventaires plus anciens, de séparer en deux sous-

groupes l'ensemble de la forêt privée depuis, au moins, 1983. Cette donnée, bien qu'inexacte, apporterait une information très utile sur l'expansion du stock et le lien entre expansion et gestion.

4.2.2 Généralisation de l'étude à l'ensemble de l'Europe

L'étude de l'expansion du stock sur pied est essentielle pour la mise en place de politiques forestières durables. Notre étude s'est focalisée sur les forêts françaises. Cependant, dans le contexte actuel mondial de changement climatique, les politiques mises en place doivent être cohérentes entre pays. Une étude basée sur une échelle spatiale plus large que l'échelle nationale est donc indispensable.

La transition forestière est particulièrement ancienne en Europe (Meyfroidt et Lambin, 2011) et les forêts européennes ont la particularité de connaître, à la fois, une expansion de surface et du stock (FAO, 2015). La quasi-totalité des pays d'Europe (**Figure 6.8**) ont mis en place un inventaire forestier et ces données peuvent être utilisées pour reproduire une étude similaire (Tomppo *et al.*, 2010). Certaines études sur l'expansion en surface et en stock sur le long terme sont déjà disponibles dans certains pays (Henttonen *et al.*, 2017 en Finlande ; Usbeck *et al.*, 2010 en Suisse). De plus, un véritable travail d'harmonisation des données des inventaires forestiers européens est effectué (Tomppo *et al.*, 2010 ; Stahl *et al.*, 2012 ; IGN, 2013) et pourrait permettre d'utiliser ces données non plus seulement à une échelle nationale mais aussi à l'échelle européenne. Ainsi, **les forêts européennes pourraient constituer un très bon cas d'étude pour l'analyse de l'expansion forestière**. De plus, leurs hétérogénéités d'un point de vue écologique (Barbati *et al.*, 2014) et de gestion permettrait de renforcer les constats de nos analyses. Certaines études ont déjà été effectuées dans ce sens mais demandent plus d'approfondissement (Kauppi *et al.*, 1992 ; Nabuurs *et al.*, 2003). **Cependant, la plupart de ces inventaires sont très récents (mis en place après 1990 ; Figure 6.8) et ne permettent donc pas encore une analyse exhaustive sur le long terme de la dynamique forestière.**

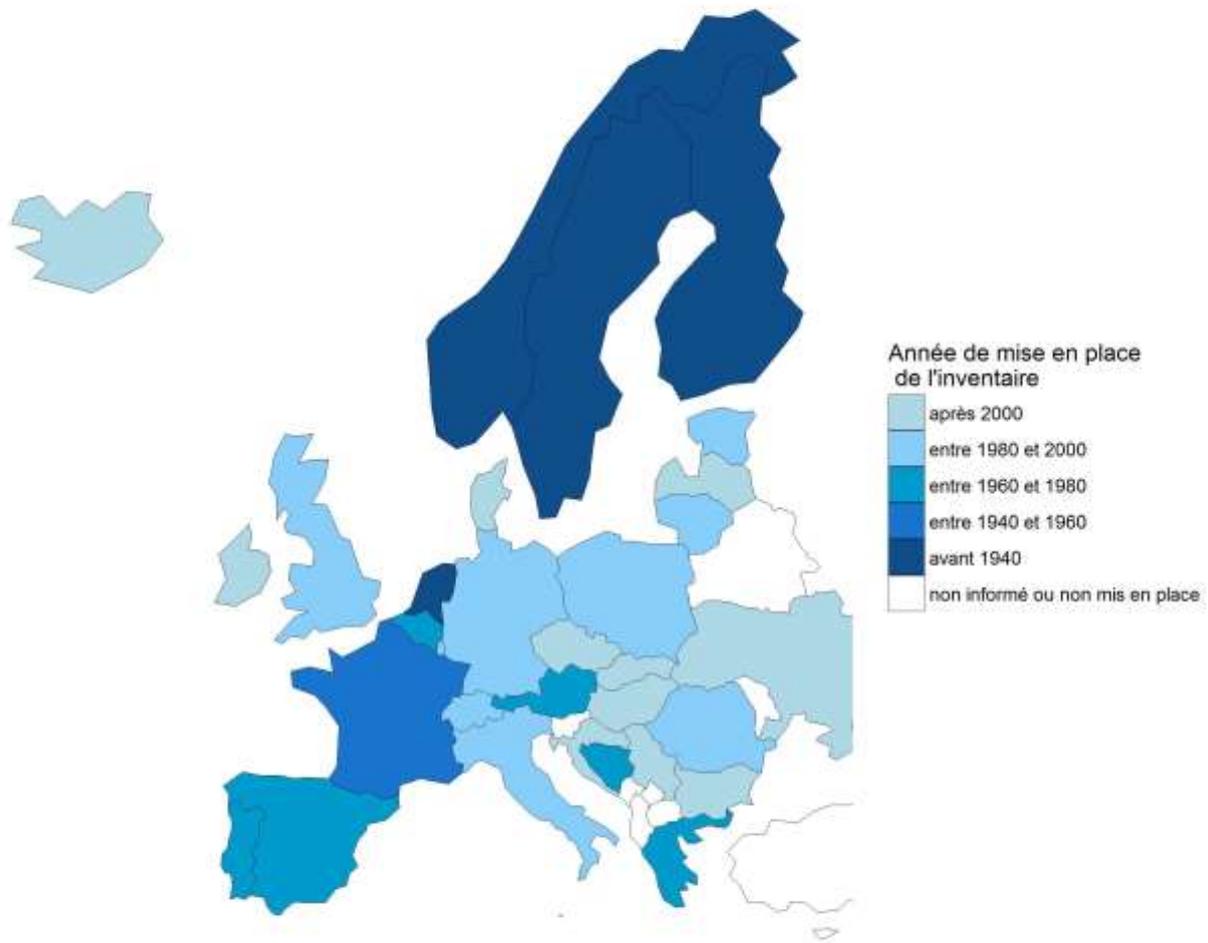


Figure 6.8. Année de mise en place de l'inventaire forestier national par pays en Europe

4.2.3 Analyse des flux par classe de diamètre

L'étude des flux présentée dans la partie IV a permis de mieux comprendre les mécanismes qui dirigent l'expansion en stock sur pied des forêts françaises et l'identification de facies dynamiques (*i.e.* des groupes de forêts présentant des dynamiques et des mécanismes d'expansion similaires).

Cette étude se base sur une partition par GRECO, type de propriété et essence. Il a, de plus, été décidé d'étudier a posteriori les classes de diamètres des facies en créant des profils diamétriques (**Figure 4.14**). Cette dernière information s'est montrée capitale car les différents profils permettent d'approcher l'âge et la densité des peuplements. Elle a permis,

entre autres de montrer la jeunesse des peuplements de certains facies (*e.g.* les peuplements de Douglas des forêts privées du Massif Central du facies 1 ; **Tableau 4.14**) ou, inversement, la maturité de certains (*e.g.* les forêts feuillues publiques en décapitalisation du facies 14). Cependant, les profils diamétriques ont aussi mis en évidence l'hétérogénéité de certains facies dynamique (*e.g.* les forêts feuillues du quart Nord-Est et du Sud-Ouest du facies 11). Pour pallier ce problème, **une partition, plus fine encore, par classe de diamètre serait envisageable et pourrait apporter une précision supplémentaire à l'analyse.**

La partition par classe de diamètre devra se faire avec beaucoup de précaution. En effet, le nombre de strates étudiées sera multiplié par le nombre de classes et le nombre d'arbres inventoriés par individu sera fortement réduit. Si ce nombre est trop faible, cela peut fortement augmenter l'imprécision de nos résultats. Il sera donc important d'apporter une attention particulière à la création des classes.

4.2.4 Etude des changements temporels des flux de bois

L'étude des flux de surface terrière a permis de comprendre les mécanismes de l'expansion de stock et d'identifier les facies dynamiques de la forêt française. Notre analyse s'est basée sur les deux premiers inventaires ancienne méthode qui étaient disponibles pour chaque département. L'utilisation de données provenant d'inventaires plus anciens (mis à notre disposition depuis) ou plus récents permettrait une analyse temporelle de ces flux permettant de mieux comprendre l'évolution de la dynamique forestière. Cependant, pour certains départements, l'étude temporelle demandera à compiler des données ancienne et nouvelle méthodes et devra donc se faire avec prudence.

4.2.5 Améliorations nécessaires pour le modèle de reconstitution de l'expansion forestière en stock sur le long terme

4.2.5.1 Différenciations des forêts anciennes et récentes

Nos simulations d'expansion du stock sur pied français depuis 1850 présentent des résultats encourageants. En effet, l'utilisation d'un modèle sigmoïde a permis d'obtenir une évolution du volume correspondant à celle observée par l'IFN depuis 1976 (**Figure 5.19**). Cependant, la ventilation des résultats entre les forêts déjà présentes en 1850 (« forêts anciennes ») et celles apparues depuis (« forêts récentes ») donne une estimation de la part du stock actuel expliqué par la capitalisation des forêts récentes faible par rapport au minimum théorique calculé (**Annexe V.3**) et montre la limite de notre modèle (**Figures 5.20 à 5.24**).

Les forêts récentes ou, à minima, celles provenant de plantations doivent présenter une courbe de capitalisation beaucoup plus rapide que celle des forêts anciennes. Ainsi, pour améliorer nos simulations, il serait envisageable d'utiliser deux modèles différents, un pour les forêts récentes et un autre pour les forêts anciennes.

Une autre voie d'approche de cette question est l'utilisation des cartes anciennes. Le croisement des points d'inventaire de l'IFN avec ces cartes anciennes, en particulier avec la

carte d'Etat-Major établie pendant la première moitié du XIX^{ème} siècle, permettrait d'attribuer à chaque point son état réel, forêt ancienne ou récente. On pourrait ainsi estimer directement la proportion de stock dans les deux types de forêt, et donc calibrer de façon beaucoup plus efficace les modèles d'évolution du stock sur pied.

4.2.5.2 Prise en compte des classes de diamètres

L'analyse de la dynamique du stock sur pied de la forêt française a montré l'importance de la prise en compte des classes de diamètre dans la compréhension de l'expansion. Il paraît donc primordial d'utiliser ces classes de diamètres dans un modèle de dynamique sur le long terme. La plupart des pays européens ont mis ou mettent en place un modèle de dynamique forestière à large échelle basé sur les données d'inventaires forestiers nationaux (Barreiro *et al.*, 2016). Ces modèles sont d'importance capitale pour l'élaboration de politiques forestières cohérente sur le long terme.

La prise en compte des classes de diamètres est l'atout des modèles matriciels (*e.g.* Werndörfer *et al.*, 2012) et nous amène donc à orienter notre choix vers ce type de modèle qui permet de prendre en compte l'hétérogénéité de la forêt française du point de vue de la structure verticale. Cependant, l'étude des changements de stocks par régression linéaire a montré l'effet négatif du stock à l'hectare (partie III, article 2). Cet effet de capital-dépendance sur les taux démographiques n'est pas encore pris en compte dans le modèle utilisé par l'IGN (modèle MARGOT ; Werndörfer *et al.*, 2012), entraînant une surestimation du stock sur pied dans des projections sur une grande période de temps. **Dans le contexte actuel de non-stationnarité des forêts, la prise en compte de cet effet de capital-dépendance est donc indispensable.** Des premiers travaux dans cette optique sont en cours au laboratoire d'inventaire forestier (Audinot, 2017).

4.2.5.3 Utilisation des enquêtes Teruti pour une projection future

Il serait également possible d'utiliser ce modèle pour étudier le volume maximum futur théorique de la forêt française. Pour cela, il est envisageable d'utiliser les données des enquêtes d'utilisation du sol (*ex* : enquêtes Teruti) afin d'estimer la surface forestière potentielle maximale française et de simuler une évolution possible de cette surface dans le futur. Le modèle de densification pourra alors être appliqué à cette trajectoire future.

4.2.6 Approche multidisciplinaire de l'expansion pour mieux prédire les changements futurs et l'impact de l'expansion sur le changement climatique

Nous avons vu que l'expansion en surface n'est pas un phénomène mécanique et que, contrairement aux changements de stocks sur pieds, les changements de surface ne présentent pas d'inertie temporelle (article 2). Ces changements, principalement dus à une expansion spontanée, sont des phénomènes complexes de changements d'utilisation du sol. Pour comprendre les causes de ces changements, des connaissances en sociologie, en politique et en économie sont indispensables. L'utilisation de modèles de changement d'utilisation du sol

(Verburg *et al.*, 2004) pourrait permettre d'estimer ces changements futurs de surfaces forestières, de les localiser, d'estimer la surface forestière française maximale et le temps nécessaire pour atteindre ce maximum. Cette amélioration de la connaissance de la dynamique des surfaces est à mettre en lien avec l'amélioration des modèles de simulation de la ressource afin de permettre des projections sur le long terme du stock forestier français

Les changements de stocks sur pied entraînent des changements au niveau du puits de carbone forestier. Le stockage du carbone dans le bois dépend de nombreux facteurs comme des essences en jeu. L'estimation de l'évolution du carbone forestier sur le long terme serait très intéressante et permettrait de quantifier l'impact de l'expansion forestière (naturelle ou par plantation) sur l'atténuation du changement climatique. Certaines études ont déjà été effectuées en Europe depuis les années 1950 (Nabuurs *et al.*, 2003 et 2013 ; Ciais *et al.*, 2008) avec des projections de la biomasse future selon différents scénarios. Des projections ont également été effectuées pour les forêts françaises (Colin, 2014 ; Valade *et al.*, 2017). Le projet XyloDensMap, consistant en la mesure de la densité du bois des arbres inventoriés par l'IFN, a pour but de permettre une meilleure évaluation de la biomasse forestière (Leban *et al.*, 2016 ; Jacquin *et al.*, 2017).

Bibliographie

ALEXANDRIAN, Daniel et GOUIRAN, Maurice. Les causes d'incendie: levons le voile. *Revue Forestière Française*, 1990, vol. 42, n° spécial, p.33-41.

ALLEN, Craig D., MACALADY, Alison K., CHENCHOUNI, Haroun, *et al.* A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest ecology and management*, 2010, vol. 259, no 4, p. 660-684.

AMAT, Jean-Paul. Guerre et milieux naturels: les forêts meurtries de l'Est de la France, 70 ans après Verdun. *L'Espace géographique*, 1987, p. 217-233.

AMAT, Jean-Paul. *La forêt entre guerre et paix 1870-1995: Etude de biogéographie historique sur l'Arc meusien de l'Argonne à la Woëvre*. 1999. Thèse de doctorat. Lille 1.

AUDINOT, Timothée. *Expansion de la surface forestière métropolitaine au cours de la première moitié du XX^e siècle : inter-comparaison et analyse de statistiques anciennes*. 2016. Rapport de projet tuteuré de master 1 FAGE. Université de Lorraine, 30p.

AUDINOT, Timothée. *Développement d'une nouvelle génération de modèle de macro-dynamique forestière pour simuler la diversité de la forêt française en transition*. 2017. Rapport de stage de master 2 FAGE. Université de Lorraine. 41p.

BALLU, Jean-Marie. Pour mobiliser la ressource de la forêt française. In : *Annales des Mines-Responsabilité et environnement*. ESKA, 2009. p. 35-42.

BARBATI, Anna, MARCHETTI, Marco, CHIRICI, Gherardo, *et al.* European forest types and forest Europe SFM indicators: tools for monitoring progress on forest biodiversity conservation. *Forest Ecology and Management*, 2014, vol. 321, p. 145-157.

BARREIRO, Susana, SCHELHAAS, Mart-Jan, KÄNDLER, Gerald, *et al.* Overview of methods and tools for evaluating future woody biomass availability in European countries. *Annals of forest science*, 2016, vol. 73, no 4, p. 823-837.

BARTHOD, Christian. La Réforme des financements publics aux investissements forestiers. *Revue forestière française*, 2001, vol. 53, n° 1, p. 9-28. DOI : 10.4267/2042/5800.

BASTIEN, Yves. Conversion – Transformation. Cours de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF), 2001.

BAZIRE, Pierre. Quelques commentaires sur les activités du Fonds Forestier National. *Revue forestière française*, 1969, vol. 21, n° 6, p. 525-535. DOI : 10.4267/2042/20291.

BAZIRE, Pierre. L'Inventaire forestier national français. *Revue Forestière Française*, 1984, vol. 36, n° spécial, p.14-24.

BAZIRE, Pierre et GADANT, Jean. *La forêt en France*. Paris : La documentation Française, 1991, 142p.

BEDDINGTON, John, BERRY, Steven, CALDEIRA, Ken, *et al.* *Letter from scientists to the EU parliament regarding forest biomass.* 2018

BETOLAUD, Yves. Un quart de siècle au service de la forêt française. *Revue Forestière Française*, 1972, vol. 24, n° spécial " Le Fonds forestier national", p. 501-504. DOI : 10.4267/2042/20655.

BLAIS, Robert. Les incendies de forêts en France. *Revue Forestière Française*, 1974, n° spécial, p. 19-20. DOI : 10.4267/2042/20881.

BOISVENUE, Céline et RUNNING, Steven W. Impacts of climate change on natural forest productivity—evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology*, 2006, vol. 12, no 5, p. 862-882.

BONTEMPS, Jean-Daniel. *Evolution de la productivité des peuplements réguliers et monospécifiques de hêtre (Fagus silvatica L.) et de chêne sessile (Quercus petraea Liebl.) dans la moitié Nord de la France au cours du XXe siècle.* 2006. Thèse de doctorat. ENGREF (AgroParisTech).

BONTEMPS, Jean-Daniel, HERVÉ, Jean-Christophe, et DHÔTE, Jean-François. Long-term changes in forest productivity: a consistent assessment in even-aged stands. *Forest Science*, 2009, vol. 55, no 6, p. 549-564.

BONTEMPS, Jean-Daniel, HERVÉ, Jean-Christophe, LEBAN, Jean-Michel, *et al.* Nitrogen footprint in a long-term observation of forest growth over the twentieth century. *Trees*, 2011, vol. 25, no 2, p. 237-251.

BONTEMPS, Jean-Daniel, HERVE, Jean-Christophe, DUPLAT, Pierre, *et al.* Shifts in the height-related competitiveness of tree species following recent climate warming and implications for tree community composition: the case of common beech and sessile oak as predominant broadleaved species in Europe. *Oikos*, 2012, vol. 121, no 8, p. 1287-1299.

BONTEMPS, Jean-Daniel. Comprendre et simuler la dynamique des forêts françaises à large-échelle. In : CGAAER. Groupe « forêt-bois ». 9 novembre 2016

BOUISSET, Christine et POTTIER, Aude. Les Landes de Gascogne: de la forêt cultivée au patrimoine naturel?. In : *Colloque international" Forêts et Paysages"*, Groupe d'histoire des forêts françaises. 2009.

BOULLEY, P. Extension des surfaces boisées en Savoie depuis le début du siècle. *Revue Forestière Française*, 1964, no 11, p. 846-852. DOI : 10.4267/2042/24598

BOURGENOT, Louis. Progrès dans la gestion des forêts soumises au régime forestier. *Revue Forestière Française*, 1976, vol. 28, no spécial " Ressources et besoins en bois de la France", p. 200-209. DOI : 10.4267/2042/21099.

- BOURGENOT, Lucien. Histoire des forêts feuillues en France. *Revue forestière française*, 1977, vol. 29, n° spécial, p. 7-26. DOI : 10.4267/2042/21193.
- BRENAC, Lucien. Connaissances statistiques des forêts françaises avant l'Inventaire forestier national. *Revue forestière française*, 1984, vol. 36, n° 1, p. 77-90. DOI : 10.4267/2042/21712
- CAVAIGNAC, S. Les sylvoécotégions (SER) de France métropolitaine, Etude de définition. *Report, French National Forest Inventory, Nogent-sur-Vernisson*, 2009.
- CAVAILHÈS, J. et NORMANDIN, D. Déprise agricole et boisement: état des lieux, enjeux et perspectives dans le cadre de la réforme de la PAC. *Revue forestière française*, 1993, vol. 45, no 4, p. 465-482. DOI : 10.4267/2042/26445
- CHAKIR, Raja et MADIGNIER, Anne-Claire. Analyse des changements d'occupation des sols en France entre 1992 et 2003. *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*, 2006, n° 296, p. 59-68. DOI : 10.4000/economierurale.1920.
- CHARRU, Marie, SEYNAVE, Ingrid, HERVÉ, Jean-Christophe, *et al.* Spatial patterns of historical growth changes in Norway spruce across western European mountains and the key effect of climate warming. *Trees*, 2014, vol. 28, no 1, p. 205-221.
- CHARRU, Marie, SEYNAVE, Ingrid, HERVÉ, Jean-Christophe, *et al.* Recent growth changes in Western European forests are driven by climate warming and structured across tree species climatic habitats. *Annals of forest science*, 2017, vol. 74, no 2, p. 33.
- CHARRU, Marie, SEYNAVE, Ingrid, MORNEAU, François, *et al.* Recent changes in forest productivity: an analysis of national forest inventory data for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France. *Forest Ecology and Management*, 2010, vol. 260, no 5, p. 864-874.
- CHAUTRAND, Louis. La Provence-Côte d'Azur. *Revue Forestière Française*, 1974, n° spécial "Les incendies de forêts", p.30-36. DOI : 10.4267/2042/20901.
- CHEVALIER, Yves. Métamorphoses de la Champagne crayeuse: déboisement et équilibre biologique. *Revue Forestière Française*, 1972, vol. 24, n° 4, p. 303-310. DOI : 10.4267/2042/20624.
- CHOLLET, F. et DEMARCQ, Ph. Réaction des hêtraies de montagne aux éclaircies tardives. *Revue forestière française*, 1998, vol. 50, no 4, p. 349-356.
- CIAIS, Philippe, SCHELHAAS, Mart-Jan, ZAEHLE, Sönke, *et al.* Carbon accumulation in European forests. *Nature Geoscience*, 2008, vol. 1, no 7, p. 425.
- CINOTTI, Bruno. Evolution des surfaces boisées en France: proposition de reconstitution depuis le début du XIXe siècle. *Revue Forestière Française*, 1996, vol. 48, n° 6, p. 547-562. DOI : 10.4267/2042/26776.

CLÉMENT, Vincent. La France méditerranéenne en feu: retour sur les incendies de forêts de l'été 2003. *Géoconfluences*, 2004, Brève n° 5, 8p.

CLÉMENT, Vincent et JAPPIOT, Marielle. La loi et la carte : deux outils de gestion du risque d'incendie dans les forêts méditerranéennes (*The law and the map : two management tools of fire hazard in the mediterranean forests*). In: *Bulletin de l'Association de géographes français*, 82e année, 2005-1 (mars). Israël-Palestine / Risques naturels et territoires, sous la direction de André-Louis Sanguin et Yvette Veyret. p. 75-84. DOI : 10.3406/bagf.2005.2441.

COLIN, Antoine. *Emissions et absorptions de gaz à effet de serre liées au secteur forestier dans le contexte d'un accroissement possible de la récolte aux horizons 2020 et 2030*. IGN, Nancy, 2014.

COMBES, Francois. Restauration des terrains en montagne. Du rêve à la réalité. *Revue Forestière Française*, 1989, vol. 41, n° 2, p. 91-106. DOI : 10.4267/2042/25964.

CONSTANTIN, E. et VAUTERIN, P. Le handicap montagne et ses incidences sur la gestion et l'exploitation forestières : la cas de la Maurienne (Savoie, France). *Revue Forestière Française*, 1998, vol. 50, n° spécial, p. 161-179. DOI : <https://doi.org/10.4267/2042/5573>.

COTTIN, Cécile. *Bilan quantitatif et impacts de l'action du Fonds Forestier National*. 1995. Rapport de stage. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.

De CRÉCY, Louis. L'histoire de la RTM: Quelques réflexions d'un praticien. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen*, 1988, vol. 59, no 1, p. 16-28.

DABAT, L. *La guerre et les forêts françaises. Programme forestier*. 1920. Paris : Imprimerie nationale, 1920. 24p.

DAUBREE, Lucien. *Statistique et Atlas des forêts de France*, 1912.

DECOOPMAN, Bertrand et DERIOZ, Pierre. Quel avenir pour les paysages de la châtaigneraie du sud du Massif Central ? *Forêt méditerranéenne*, 1994, vol. 15, no 3, p. 361-364

DEGRON, R. La conversion des forêts domaniales feuillues françaises (1860-1888) : une grande vague brisée. *Revue forestière française*, 1998, vol. 50, n° 1, p. 71-84. DOI : 10.4267/2042/5516.

DEGRON, Robin. *Forêts, temps et sociétés: les conversions forestières de Lorraine: bilan, contrastes, rythmes et ruptures*. 1999. Thèse de doctorat. Nancy 2.

DELONG, J. R. Quarante ans de communauté de vie avec le Fonds forestier national. *Revue Forestière Française*, 1987, vol.39, n° spécial "Le Fonds forestier national a 40 ans", p.165-167. DOI : 10.4267/2042/25842.

DENARDOU, Anaïs, HERVÉ, Jean-Christophe, DUPOUEY, Jean-Luc, *et al.* L'expansion séculaire des forêts françaises est dominée par l'accroissement du stock sur pied et ne sature pas dans le temps. *Revue Forestière Française*, 2017.

DHÔTE, Jean-François et HERVÉ, Jean-Christophe. Changements de productivité dans quatre forêts de chênes sessiles depuis 1930: une approche au niveau du peuplement. *Annals of forest science*, 2000, vol. 57, no 7, p. 651-680.

DIRECTION DES FORÊTS. Les réactions des pouvoirs publics lors de la tempête des 6, 7 et 8 novembre 1982. *Revue Forestière Française*, 1987, vol. 39, n° 4, p.257-268. DOI : 10.4267/2042/25795.

DODANE, Clément. *Les nouvelles forêts du Massif Central: enjeux sociétaux et territoriaux. Ces hommes qui plantaient des résineux pour éviter la friche*. 2009. Thèse de doctorat. Ecole normale supérieure Lettres et Sciences Humaines-ENS-LSH Lyon.

DOLL, Daniel. Statistiques historiques des grands chablis éoliens en Europe occidentale depuis le milieu du XIXe siècle: analyse critique. *Expertise collective sur les tempêtes, la sensibilité des forêts et sur leur reconstitution. Les Dossiers de l'Environnement*, 2000, vol. 20, p.38-41.

DORLANNE, Dominique. Les sylviculteurs en face du risque d'incendie. *Revue Forestière Française*, 1975, n° spécial "Les incendies de forêts", p.455-460. DOI : 10.4267/2042/21012.

DOUGUEDROIT, A. Les périmètres de reboisement dans les Alpes du Sud. *Revue Forestière Française*, 1980, n° spécial "Société et Forêts", p.37-46. DOI : 10.4267/2042/21479.

DRUMMOND, Mark A. et LOVELAND, Thomas R. Land-use pressure and a transition to forest-cover loss in the eastern United States. *BioScience*, 2010, vol. 60, no 4, p. 286-298.

DSF. La lettre du DSF. *Lettre du DSF*, 2016, n°51, 15 p.

DUFAY, B. Témoignage personnel sur la création du Fonds forestier national. *Revue Forestière Française*, 1972, vol. 24, n° spécial "Le Fonds forestier national", p.517-518. DOI : 10.4267/2042/20657.

DUPIRE, Sylvain, BOURRIER, Franck, MONNET, Jean-Matthieu, *et al.* Sylvaccess: un modèle pour cartographier automatiquement l'accessibilité des forêts. *Revue forestière française*, 2015, vol. 70, no 2, p. 111-126. DOI : <https://doi.org/10.4267/2042/57902>

DURIN, Sheona. *Les plantations du Fonds Forestier National : Retour sur une expérience de reboisement de grande ampleur dans une perspective d'adaptation au changement climatique*. 2012. Rapport de stage.

EFRON, Bradley. *The jackknife, the bootstrap, and other resampling plans*. Siam, 1982.

- EGNELL, Gustaf, LAUDON, Hjalmar, et ROSVALL, Ola. Perspectives on the potential contribution of Swedish forests to renewable energy targets in Europe. *Forests*, 2011, vol. 2, n° 2, p. 578-589. DOI : 10.3390/f2020578
- ELFVING, Björn et KIVISTE, Andres. Construction of site index equations for *Pinus sylvestris* L. using permanent plot data in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 1997, vol. 98, no 2, p. 125-134.
- EUROPEAN COMMISSION. *Sustainable agriculture, forestry and fisheries in the bioeconomy - A challenge for Europe*. 2015, 4th SCAR Foresight Exercise
- FAO. *Global forest resource assessment update 2005: terms and definitions*. Rome: Forest Resource Assessment Programme, 2004.
- FAO. *Evaluation des ressources forestières mondiales 2015*. Rome, 2015. 245 p.
- FAURE, Marcel. Les incendies de forêt dans l'histoire: quelques leçons du passé. *Forêt méditerranéenne*, 1987, vol. 9, n° 2, p.189-194
- FERRON, Jean-Louis. Le douglas, nouvelle ressource nationale. *Revue Forestière Française*, 2014, vol. 66, n° 3, p. 289-300. DOI : 10.4267/2042/56059
- FESQUET, Frédéric. *Un corps quasi-militaire dans l'aménagement du territoire: le corps forestier et le reboisement des montagnes méditerranéennes en France et en Italie aux XIX et XX èmes siècles*. 1997. Thèse de doctorat. Université Paul Valéry.
- FJELLSTAD, W. J. et DRAMSTAD, Wenche E. Patterns of change in two contrasting Norwegian agricultural landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 1999, vol. 45, no 4, p. 177-191.
- FOREST EUROPE. *Full state of Europe's forests 2015*. Madrid, 2015. p. 314.
- FOURCHY, Pierre. Remarques sur la question du déboisement des Alpes. *Revue de géographie alpine*, 1944, vol. 32, n° 1, p. 113-128.
- FRANC, Alain, GOURLET-FLEURY, Sylvie, et PICARD, Nicolas. Une introduction à la modélisation des forêts hétérogènes, ENGREF, Nancy, 2000. *INRIA The PlantGL library*, vol. 39.
- GADANT, J. Quarante ans au service de la forêt française. *Revue Forestière Française*, 1987, vol. 39, n° spécial "Le Fonds forestier national a 40 ans", p. 10-18. DOI : 10.4267/2042/25831.
- De GALBERT, Michel, MAGRUM, Max et MORIN, Georges-André. Valorisation agricole et forestière de l'espace rural. *Rapport du CGAAER*, 2015, n°14064, 165p.
- GALLARDO, Leonard. *Chapitre 4 : Notions sur les statistiques d'ordre et les distributions d'échantillonnage*. 2007. Cours de statistiques, Master 1, Université de Tours.

- GARET, Elie. *Le coût national annuel de maintien ou confortement des peuplements forestiers de protection en montagne*. 2015. Rapport de stage de deuxième année d'école d'ingénieur. AgroParisTech-centre de Nancy.
- GASDON, Hervé. La restauration des terrains de montagne et le temps des forestiers (1827-1914). Colloque HisTraFor 2012. ONF – *Les dossiers forestiers*, 2013, n°24, p. 77-87.
- GELDREICH, P., *Le Nouvel aménagement de la forêt indivise de Haguenau, 1993-2012*. 1994, ville de Haguenau, 12 p.
- GELLRICH, Mario, BAUR, Priska, KOCH, Barbara, ZIMMERMANN et Niklaus E. Agricultural land abandonment and natural forest re-growth in the Swiss mountains: a spatially explicit economic analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, vol. 118, p. 93-108.
- GÉNÉRE, Benoît et BAUDRY, Jonas. L'évolution des aides directes et fiscales à la forêt privée: le cas du Loiret. *Revue Forestière Française*, 2006, vol. 58, n° 6, p. 499-508. DOI : 10.4267/2042/8018.
- GIRAUT, Philippe. Les propriétaires privés. *Revue Forestière Française*, 1972, vol. 24, n° spécial "Le Fonds forestier national", », p. 630-632. DOI : 10.4267/2042/20678.
- GLATZEL, Gerhard. Historic forest use and its possible implications to recently accelerated tree growth in Central Europe. In : *Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe, EFI proceedings*. 1999.
- GOUDET, Morgane et PIOU, Dominique. La Chalarose du Frêne: que sait-on? *Revue Forestière Française*, 2012, vol. 64, n° 1, p. 27-40. DOI : 10.4267/2042/47436.
- GRACE, John, BERNINGER, Frank et NAGY, Laszlo. Impacts of climate change on the tree line. *Annals of Botany*, 2002, vol. 90, n° 4, p. 537-544. DOI : 10.1093/aob/mcf222
- GUILLARD, J. Tempêtes et forêts. *Revue Forestière Française*, 1983, vol. 35, n° 1, p. 6-8. DOI : 10.4267/2042/21962.
- HENRY, E. L'enlèvement de la couverture et la végétation du hêtre (dernières recherches allemandes). *Revue des eaux et forêts*, 1901, tome quatrième, 3^e série, 5^e année, p. 142-144.
- HENTTONEN, Helena M., NÖJD, Pekka et MÄKINEN, Harri. Environment-induced growth changes in the Finnish forests during 1971–2010 – An analysis based on National Forest Inventory. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 386, p. 22-36. DOI : 10.1016/j.foreco.2016.11.044
- HERVÉ, Jean-Christophe, WURPILLOT, Stéphanie, VIDAL, Claude et ROMAN-AMAT, Bernard. L'inventaire des ressources forestières en France: un nouveau regard sur de nouvelles forêts. *Revue Forestière Française*, 2014, vol. 66, n° 3, p. 247-260. DOI : 10.4267/2042/56055

HOUGHTON, Richard A., HACKLER, Joseph L., LAWRENCE et Kira T. The US carbon budget: contributions from land-use change. *Science*, 1999, vol. 285, n° 5427, p. 574-578. DOI: 10.1126/science.285.5427.574

HÜFFEL, Gustave. Statistique des forêts de l'Alsace-Moselle. *Revue des eaux et forêts*, 1920, vol. 7, n° 13, p. 185-188.

HUSSON, Jean-Pierre et DEGRON, Robin. L'aménagement forestier entre conjoncture et temps long, rupture et continuité/Long and short-term in forest management. In : *Annales de géographie*. Armand Colin, 1999. p. 595-602.

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL. *But et méthodes de l'inventaire forestier national*. Paris, 1985, -68p.

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL. Les tempêtes de décembre 1999 bilan national et enseignements. *L'IF*, 2003, n° 2

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL. La forêt française. Résultats des trois premières campagnes nationales annuelles. *L'IF*, 2008, n° 19.

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL. Tempête Klaus du 24 Janvier 2009 : 234 000 hectares de forêt affectés à plus de 40% 42,5 millions de mètres cubes de dégât. *L'IF*, 2009, n° 21.

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL. Une nouvelle partition écologique et forestière du territoire métropolitain : les sylvoécorégions (SER). *L'IF*, 2011a, n° 26.

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL. Volume de bois sur pied dans les forêts françaises : 650 millions de mètres cubes supplémentaires en un quart de siècle. *L'IF*, 2011b, n° 27.

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL. Prélèvements de bois en forêt et production biologique : des estimations directes et compatibles. *L'IF*, 2011c, n° 28.

INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET FORESTIERE. Quelles sont les ressources exploitables ? Analyse spatiale et temporelle. *L'IF*, 2012, n° 30.

INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET FORESTIERE. Towards harmonized European forest information. *L'IF*, 2013, n° 32.

INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET FORESTIERE. Les données de l'inventaire forestier : état des lieux et évolution. *L'IF*, 2014, n° 34.

INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET FORESTIERE. Portrait des forêts privées avec ou sans plan simple de gestion. *L'IF*, 2018, n° 41.

JACQUIN, Philippe, LONGUETAUD, Fleur, LEBAN, Jean-Michel, *et al.* X-ray microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices. *Dendrochronologia*, 2017, vol. 42, p. 42-50.

JAUDON, Bruno, LEPART, Jacques, MARTY, Pascal, *et al.* Hommes et arbres du Causse Méjan. *Histoire & Sociétés Rurales*, 2009, vol. 32, no 2, p. 7-47.

KARJALAINEN, Timo, PUSSINEN, Ari, LISKI, Jari, *et al.* Scenario analysis of the impacts of forest management and climate change on the European forest sector carbon budget. *Forest Policy and Economics*, 2003, vol. 5, n° 2, p. 141-155.

KAUPPI, Pekka E., MIELIKÄINEN, Kari, et KUUSELA, Kullervo. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. *Science*, 1992, vol. 256, no 5053, p. 70-74. DOI: 10.1126/science.256.5053.70

KAUPPI, Pekka E., AUSUBEL, Jesse H., FANG, Jingyun, *et al.* Returning forests analyzed with the forest identity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, vol. 103, n° 46, p. 17574-17579.

KEENAN, Rodney J., REAMS, Gregory A., ACHARD, Frédéric, *et al.* Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 352, p. 9-20.

KEENLEYSIDE, Clunie, TUCKER, Graham, et MCCONVILLE, Andrew. Farmland Abandonment in the EU: an Assessment of Trends and Prospects. *Institute for European Environmental Policy, London*, 2010.

KAHLE, H.P., KARJALAINEN, T., SCHUCK, A., ÅGREN, G.I., KELLOMÄKI, S., MELLERT, K.H., PRIETZEL, J., REHFUESS, K.E., SPIECKER, H. *Causes and consequences of forest growth trends in Europe – Results of the recognition project*, European Forest Research Institute. Research Report n° 21, 2008. Brill: Leiden, Netherlands, Boston, United-States, Köln, Germany. ISBN: 9789004167056

KOERNER, W., BENOÎT, M., DAMBRINE, Etienne et DUPOUEY, Jean-Luc. Influence des anciennes pratiques agricoles sur la végétation et les sols des forêts reboisées dans le massif vosgien. *Revue forestière française*, 1999, vol. 51, n° 2, p. 231-238.

KOERNER, Waltraud, CINOTTI, Bruno, JUSSY, J.-H., *et al.* Evolution des surfaces boisées en France depuis le début du XIXe siècle: identification et localisation des boisements des territoires agricoles abandonnés. *Revue forestière française*, 2000, vol. 52, n° 3, p. 249-270. DOI : 10.4267/2042/5359.

KOERNER, Waltraud, DUPOUEY, J. L., DAMBRINE, E., *et al.* Influence of past land use on the vegetation and soils of present day forest in the Vosges mountains, France. *Journal of ecology*, 1997, p. 351-358.

LANDMANN, Guy. La santé des forêts françaises en 1995. *Revue Forestière Française*, 1996, vol. 48, n° 6, p. 527-536. DOI : 10.4267/2042/26774.

- LANDMANN, Guy. La santé des forêts françaises en 1996. *Revue Forestière Française*, 1998, vol. 50, n° 1, p. 21-32. DOI : 10.4267/2042/5509.
- LANDMANN, Guy. La santé des forêts françaises: actualités de l'année 1997 et nouveaux acquis. *Revue forestière française*, 1999, vol. 51, n° 1, p. 7-19. DOI : 10.4267/2042/5419.
- LANDMANN, Guy. La santé des forêts françaises : bilan des années 2000 et 2001 et nouveaux acquis. *Revue forestière française*, 2002, vol. 54, n° 4, p. 375-388. DOI : 10.4267/2042/4929
- LAROCHE, B., THORETTE, J., et LACASSIN, J.-Cl. L'artificialisation des sols: pressions urbaines et inventaire des sols. *Étude et gestion des sols*, 2006, vol. 13, no 3, p. 223-235.
- LARRÈRE, R., BRUN, A., KALAORA, B., *et al.* Reboisement des montagnes et systèmes agraires. *Revue Forestière Française*, 1980, S, fascicule thématique" Société et Forêts", 1980.
- LASANTA, Teodoro, ARNÁEZ, J., PASCUAL, N., *et al.* Space–time process and drivers of land abandonment in Europe. *Catena*, 2017, vol. 149, p. 810-823.
- LEBAN, J.M., HERVE, J.C., BONTEMPS, J.D., LONGUETAUD, F., MOTHE, F., JACQUIN, P. *Measurement of the annual biomass increment of the French forests XyloDensMap project.* In IUFRO conference “Modelling wood quality, supply and value chain networks – wood QC”, 12-18 June 2016, Québec, 12 diapositives.
- LEBEDYS, A., *et al.* La contribution du secteur forestier aux économies nationales: Tendances et situation actuelle. Division de l'économie et des produits forestiers, Rome, 2004.
- LEPART, J., MARTY, P., et FONDERFLICK, J. Dynamique des paysages agro-pastoraux des Causses et biodiversité. *Fourrages*, 2011, vol. 208, p. 343-352.
- LEROUX, R. Reboisement et défrichement de la Champagne crayeuse. *Revue Forestière Française*, 1961, n° 10, p.605-619. DOI : <https://doi.org/10.4267/2042/24320>
- LI, P., ZHU, J., HU, H., PAN, Y., BIRDSEY, R. et FANG, J. The relative contributions of forest growth and areal expansion to forest biomass carbon. *Biogeosciences*, 2016, vol. 13, no 2, p. 375-388. DOI: 10.5194/bg-13-375-2016
- LISKI, Jari, LEHTONEN, Aleks, PALOSUO, Taru, *et al.* Carbon accumulation in Finland's forests 1922–2004—an estimate obtained by combination of forest inventory data with modelling of biomass, litter and soil. *Annals of Forest Science*, 2006, vol. 63, no 7, p. 687-697.
- LORAN, Christin, GINZLER, Christian, et BÜRGI, Matthias. Evaluating forest transition based on a multi-scale approach: forest area dynamics in Switzerland 1850–2000. *Regional environmental change*, 2016, vol. 16, no 6, p. 1807-1818.

MAAF ; IGN, 2016. *Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines*, édition 2015, Résultats.

MAGNIER, Céline. Le risque de feux de forêts en France. *Etudes et documents*, 2011, n° 45.

MAREY-PÉREZ, M. F., RODRÍGUEZ VICENTE, V., et CRECENTE MASEDA, R. Using GIS to measure changes in the temporal and spatial dynamics of forestland: experiences from north-west Spain. *Forestry*, 2006, vol. 79, no 4, p. 409-423. DOI : 10.1093/forestry/cpl027

MARIE, Robert et FEUVRIER, J. P. La programmation des opérations RTM Un outil efficace pour la prévention. *Géologie alpine*, 1990, hors-série, n° 15, p.157-163.

MARNEZY, Alain, MIETTON, Michel et BOULANAACHE, L. Vents maximums en Savoie et impact des tempêtes durant l'hiver 1989-1990/Gale-force winds in the Department of Savoie and the impact of storms during the winter of 1989-90. *Revue de Géographie de Lyon*, 1991, vol. 66, n° 3-4, p. 207-221.

MATHER, Alexander S. The forest transition. *Area*, 1992, vol. 24, n° 4, p. 367-379.

MATHER, Alexander S., FAIRBAIRN, J. et NEEDLE, Coby L. The course and drivers of the forest transition: the case of France. *Journal of Rural Studies*, 1999, vol. 15, n° 1, p. 65-90.

MATHEY, Alphonse. *Traité d'exploitation commerciale des bois*. Lucien Laveur, éditeur, Paris, 1908.

MCKECHNIE, Jon, COLOMBO, Steve, CHEN, Jiabin, *et al.* Forest bioenergy or forest carbon? Assessing trade-offs in greenhouse gas mitigation with wood-based fuels. *Environmental science & technology*, 2010, vol. 45, no 2, p. 789-795.

MERCIER, Charles. Le massif landais. *Revue Forestière Française*, 1974, n° spécial "Les incendies de forêts", p. 21-25.

MERIAN, Pierre, HERVE, Jean-Christophe. *Évaluation de la qualité de la mesure de l'accroissement radial sur 5 ans de l'inventaire forestier national*. 2014, IGN, note technique

MEYFROIDT, Patrick et LAMBIN, Eric F. Forest transition in Vietnam and displacement of deforestation abroad. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, vol. 106, no 38, p. 16139-16144. DOI : 10.1073/pnas.0904942106

MEYFROIDT, Patrick et LAMBIN, Eric F. Global forest transition: prospects for an end to deforestation. *Annual review of environment and resources*, 2011, vol. 36, p. 343-371. DOI : 10.1146/annurev-environ-090710-143732

MEYFROIDT, Patrick, RUDEL, Thomas K., et LAMBIN, Eric F. Forest transitions, trade, and the global displacement of land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, vol. 107, no 49, p. 20917-20922.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE. *Statistique agricole de la France. Résultats généraux de l'enquête décennale de 1892. 1897.*

MINISTERE DE L'AGRICULTURE. *Statistique agricole de la France. Résultats généraux de l'enquête décennale de 1929. 1936.*

MINISTERE DE L'AGRICULTURE. Indicators for the sustainable management of French forests (Convention n°2005-CER-6-026 of 27 May 2005). Final report, 2006.

MINISTERIUM FÜR ELSASS-LOTHRINGEN. Beiträge zur Forststatistik von Elsass-Lothringen. Strasbourg, 1909, vol. 26.

MOREL, Michel. Après les tempêtes de décembre 1999, la filière forêt bois sort de l'épreuve. *Agreste Primeur*, 2003, n° 120.

MORIN, Georges-André. La continuité de la gestion des forêts françaises de l'ancien régime à nos jours, ou comment l'Etat a-t-il pris en compte le long terme. *Revue française d'administration publique*, 2010, no 2, p. 233-248.

MORNEAU, François, DUPREZ, Cédric, et HERVÉ, Jean-Christophe. Les forêts mélangées en France métropolitaine. Caractérisation à partir des résultats de l'Inventaire forestier national. *Revue forestière française*, 2008, vol. 60, n° 2, p. 107-120.

MOTTET, Anne. *Transformations des systèmes d'élevage depuis 1950 et conséquences pour la dynamique des paysages dans les Pyrénées. Contribution à l'étude du phénomène d'abandon de terres agricoles en montagne à partir de l'exemple de quatre communes des Hautes-Pyrénées.* 2005. Thèse de doctorat.

NABUURS, Gert-Jan, SCHELHAAS, Mart-Jan, MOHREN, Godefridus (frits) MJ, *et al.* Temporal evolution of the European forest sector carbon sink from 1950 to 1999. *Global change biology*, 2003, vol. 9, no 2, p. 152-160. DOI : 10.1046/j.1365-2486.2003.00570.x

NABUURS, Gert-Jan, LINDNER, Marcus, VERKERK, Pieter J., GUNIA, Katja, DEDA, Paola, MICHALAK, Roman et GRASSI, Giacomo. First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nature Climate Change*, 2013, vol. 3, n° 9, p. 792. DOI : 10.1038/NCLIMATE1853

NAIZOT, Florence. Les changements d'occupation des sols de 1990 à 2000: plus d'artificial, moins de prairies et de bocages. *Les données de l'environnement*, 2005, no 101, p. 1-4.

NAUDTS, Kim, CHEN, Yiyang, MCGRATH, Matthew J., RYDER, James, VALADE, Aude, OTTO, Juliane et LUYSSAERT, Sebastiaan. Europe's forest management did not mitigate climate warming. *Science*, 2016, vol. 351, n° 6273, p. 597-600. DOI: 10.1126/science.aad7270

NEMOZ-RAJOT, H. Le Régime forestier: une mosaïque moderne et évolutive. *Revue forestière française*, 1998, vol. 50, n° 1, p. 10-19.

- OGÉ, Frédéric. Les prémices de la politique de restauration des terrains en montagne. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen*, 1988, vol. 59, n° 1, p. 9-15.
- PAGNUTTI, Chris, BAUCH, Chris T., et ANAND, Madhur. Outlook on a worldwide forest transition. *PloS one*, 2013, vol. 8, no 10, p. e75890.
- PAN, Yude, BIRDSEY, Richard A., FANG, Jingyun, *et al.* A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, p. 1201609.
- PARDE, J. Il y a 100 ans : Prosper Demontzey (1831-1898) et l'essor de la R.T.M. *Revue forestière française*, 1998, vol. 50, n° 3, p. 277-282. DOI : 10.4267/2042/5539.
- PEARSON, Chris. L'âge du bois : les forêts françaises pendant la Seconde Guerre mondiale. *Revue forestière française*, 2007, vol 59, n° 4, p. 393-416. DOI : 10.4267/2042/9850.
- PEYRON, Jean-Luc, HERVE, Jean-Christophe. Comment apprécier le niveau d'exploitation des ressources forestières françaises ? *Revue forestière française*, 2013, vol. 64, n° 5, p. 599-611. DOI : 10.4267/2042/50649.
- PIGNARD, Gêrôme. *Estimation des prélèvements de bois dans la forêt française; approche forestière de l'autoconsommation*. Inventaire forestier national IFN : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie Ademe, 1994.
- PIGNARD, Gêrôme. Evolution récente des forêts françaises: surface, volume sur pied, productivité. *Revue Forestière Française*, 2000, vol. 52, n° spécial, p. 27-36. DOI : 10.4267/2042/5404
- POINTEREAU, Philippe et COULON, Frédéric. Abandon et artificialisation des terres agricoles. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 2009, vol. 57, n° 57, p. 109-120.
- POURTET, Jean. L'évolution dans le choix des essences de reboisement. *Revue Forestière Française*, 1972, vol. 24, n° spécial "Le Fonds forestier national", p. 567-575. DOI : 10.4267/2042/20666.
- PRETZSCH, Hans. Forest dynamics, growth, and yield. In : *Forest Dynamics, Growth and Yield*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. p. 1-39.
- PUYO, Jean-Yves. Les conséquences de la Première Guerre mondiale pour les forêts et les forestiers français. *Revue forestière française*, 2004, vol. 56, n° 6, p. 573-584. DOI : 10.4267/2042/5123.
- RENEWICK, Alan, JANSSON, Torbjorn, VERBURG, Peter H., *et al.* Policy reform and agricultural land abandonment in the EU. *Land use policy*, 2013, vol. 30, no 1, p. 446-457.
- RHEMTULLA, Jeanine M., MLADENOFF, David J., et CLAYTON, Murray K. Historical forest baselines reveal potential for continued carbon sequestration. *Proceedings of the*

National Academy of Sciences, 2009, vol. 106, n° 15, p. 6082-6087. DOI : 10.1073/pnas.0810076106

RIEUTORT, Laurent. *L'élevage ovin en France: espaces fragiles et dynamique des systèmes agricoles*. Presses Univ Blaise Pascal, 1995.

RIOM, J. Le dépérissement du pin maritime dans le sud-est de la France au cours des années 1960-1970: le rôle de la cochenille *Matsucoccus feytaudi* Duf. (Coccoidea, Margarodidae). *Revue Forestière Française*, 1994, vol. 46, n° 5, p. 437-445. DOI : 10.4267/2042/26568.

ROBERT, Nicolas, VIDAL, Claude, COLIN, Antoine, HERVE, Jean-Christophe, *et al.* France. In : TOMPPO, Erkki, GSCHWANTNER, Thomas, LAWRENCE, Mark, et McROBERTS, Ronald E. *National forest inventories. Pathways for Common Reporting*. Springer, Heidelberg, Germany, Dordrecht, Netherland, London, United Kingdom, New York, United States, 2010, p.207-221.

ROSENBAUM, Kenneth L., LINDSAY, Jonathan M., *et al.* An overview of national forest funds: current approaches and future opportunities. In : *International workshop of experts on financing sustainable forest management (Oslo, Norway, 22–25 January 2001)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 2001.

ROUSSEAU, P. L'évolution des forêts françaises métropolitaines d'après les statistiques forestières. *Revue forestière française*, 1990, vol. 42, n° 1, p. 56-68. DOI : 10.4267/2042/26042

ROUX, A., DHÔTE, J.-F., ACHAT, D., BASTICK, C., *et al.* 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 d'étude pour le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA et IGN, 2017, 96 p. + 226 p

RUDEL, Thomas K., COOMES, Oliver T., MORAN, Emilio, *et al.* Forest transitions: towards a global understanding of land use change. *Global environmental change*, 2005, vol. 15, no 1, p. 23-31.

SAILLET, B. De l'utilité des boisements pour la restauration et la conservation des terrains en montagne. *Revue forestière française*, 1991, vol. 43, n° 2, p. 119-130. DOI : 10.4267/2042/26188.

SÄRNDAL, C. E. Méthodes pour estimer la précision des estimations d'une enquête ayant fait l'objet d'une imputation. *Techniques d'enquête*, 1992, vol. 18, p. 257-268.

SCHAEFFER, L. Le pour et le contre dans les conversions. *Revue Forestière Française*, 1949, n° 9 et 10, p. 413-420. DOI : 10.4267/2042/27635.

- SCHVESTER, D. Les insectes et la forêt française. *Revue Forestière Française*, 1985, vol. 37, n° spécial "Regards sur la santé de nos forêts", p. 45-64. DOI : 10.4267/2042/21853.
- SCHWAPPACH, A.F. Über den Einfluss des Streurechens auf den Wachstum das Buchenbeständen, *Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen*, 1900, vol. 32, 347-364.
- SEARCHINGER, Timothy D., BERINGER, Tim, HOLTSMARK, Bjart, *et al.* Europe's renewable energy directive poised to harm global forests. *Nature Communications*, 2018, vol. 9, no 1, p. 3741.
- SINGH, M. P., BHOJVAID, P. P., REDDY, S. R., *et al.* Evidences and aspects of forest transition in India. *Indian Forester*, 2014, vol. 140, no 8, p. 737-746.
- SKOVSGAARD, Jens Peter et VANCLAY, Jerome K. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2008, vol. 81, no 1, p. 13-31.
- SMITH, W. Brad, MILES, Patrick D., VISSAGE, John S., *et al.* Forest resources of the United States, 2002. General Technical Report NC-241, 2004, North Central Research Station, St. Paul, United-States; 137p. DOI: 10.2737/NC-GTR-241
- SPIECKER, Heinrich, MIELIKÄINEN, Kari, KÖHL, Michael, *et al.* (ed.). *Growth trends in European forests: studies from 12 countries*. Springer, Berlin, 1996.
- STÅHL, Göran, CIENCIALA, Emil, CHIRICI, Gherardo, *et al.* Bridging national and reference definitions for harmonizing forest statistics. *Forest Science*, 2012, vol. 58, no 3, p. 214-223.
- TABEAUD, Martine et SIMON, Laurent. Dommages et dégâts dans les forêts françaises: éléments pour un bilan. In : *Annales de géographie*, 1993, vol. 102, n° 572, p. 339-358. DOI : 10.3406/geo.1993.21157
- THIRGOOD, J. V. Man's impact on the forests of Europe. *Journal of World Forest Resource Management*, 1989, vol. 4, p. 127-167.
- TOMPPO, Erkki, GSCHWANTNER, Thomas, LAWRENCE, Mark, et McROBERTS, Ronald E. *National forest inventories. Pathways for Common Reporting*. Springer, Heidelberg, Germany, Dordrecht, Netherland, London, United Kingdom, New York, United States, 2010.
- UNITED NATIONS CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (1992: RIO DE JANEIRO, BRAZIL). *Report of the United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, 3-14 June 1992*. New York: United Nations, 1993.
- USBECK, Tilo, WOHLGEMUTH, Thomas, DOBBERTIN, Matthias, *et al.* Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, vol. 150, n° 1, p. 47-55.

- DE VAISSIERE, Jean. Les principes de bases (1947-1950). *Revue Forestière Française*, 1952, n° 9, p.529-548. DOI : <https://doi.org/10.4267/2042/27893>
- VALADE, Aude, BELLASSEN, Valentin, LUYSSAERT, Sebastiaan, *et al.* Bilan carbone de la ressource forestiere francaise. *Projections du puits de carbone de la filière forêt-bois française et incertitude sur ses déterminants*. Rapport final, Paris. ADEME/1260C0056, 2017.
- VALLAURI, Daniel, GREL, Audrey, GRANIER, Evelyne, *et al.* *Les forêts de Cassini. Analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles*. 2012.
- VANNINI, Andrea et VETTRAINO, Anna Maria. Ink disease in chestnuts: impact on the European chestnut. *Forest Snow and Landscape Research*, 2001, vol. 76, n° 3, p. 345-350.
- VERBURG, Peter H., SCHOT, Paul P., DIJST, Martin J., *et al.* Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal*, 2004, vol. 61, n° 4, p. 309-324.
- VIDAL, Claude, LANZ, Adrian, TOMPPPO, Erkki, *et al.* Establishing forest inventory reference definitions for forest and growing stock: a study towards common reporting. *Silva Fennica*, 2008, vol. 42, n° 2, p. 247-266.
- WERNSDÖRFER, Holger, COLIN, Antoine, BONTEMPS, Jean-Daniel, *et al.* Large-scale dynamics of a heterogeneous forest resource are driven jointly by geographically varying growth conditions, tree species composition and stand structure. *Annals of Forest Science*, 2012, vol. 69, no 7, p. 829-844. DOI : 10.1007/s13595-012-0196-1
- WESTOBY, Mark. The self-thinning rule. *Advances in Ecological Research*, 1984, vol. 14, p.167-225.
- WILKENSJELD, Stiig, KLOSTER, Silvia, PONGRATZ, Julia, *et al.* Comparing the influence of net and gross anthropogenic land-use and land-cover changes on the carbon cycle in the MPI-ESM. *Biogeosciences*, 2014, vol. 11, p. 4817-4828.
- ZEIDE, Boris. Analysis of growth equations. *Forest science*, 1993, vol. 39, no 3, p. 594-616.
- ZHANG, Yaoqi. Deforestation and forest transition: theory and evidence in China. In : *World forests from deforestation to transition?*. Springer, Dordrecht, 2000. p. 41-6

Annexes de la partie IV

Annexe IV.1. Une partition idéalisée et régionalisée de la composition en espèces ligneuses des forêts françaises pour l'analyse de leurs ressources en bois

Article soumis à la revue *Ecoscience* en septembre 2018

Jean-Daniel Bontemps¹, Jean-Christophe Hervé^{1,†}, Anaïs Denardou^{1,2}

¹IGN, Laboratoire de l'Inventaire Forestier, 14 rue Girardet, 54000 Nancy.
Jdbontemps.ign@gmail.com, Anais.Denardou@ign.fr

²INRA, Centre Grand-Est, UMR 1137 INRA/Université de Lorraine Ecologie Ecophysiologie Forestière, route d'Amance, 54280 Champenoux

† décédé le 16 avril 2017, et ayant contribué à formuler les bases de l'analyse

Correspondance : Jean-Daniel Bontemps, Jdbontemps.ign@gmail.com

Résumé

Les espèces forestières ligneuses conditionnent fortement la dynamique et la gestion des forêts. La diversité des forêts françaises est la plus élevée d'Europe, et limite l'analyse quantitative de ces ressources. Une partition de la surface des forêts françaises en compositions ligneuses dominantes et organisée par grandes régions écologiques (GRECO) est développée pour réduire cette diversité.

Cette partition repose sur la composition en espèces mesurée par l'inventaire forestier national (2006-2015, >65,000 placettes), et sur une typologie préexistante. Elle exploite la distribution en J de l'abondance des compositions élémentaires, identifie des compositions dominantes décrivant au moins 50% des surfaces des GRECO, les compositions minoritaires étant regroupées. Une première application est proposée avec la ventilation du stock de bois selon ces compositions.

Cette partition décrit 61,4% de la surface forestière du pays (66% du stock de bois) selon 29 compositions dominantes, démontrant son efficacité. Ces compositions révèlent l'importance des mélanges feuillus, et de strates forestières négligées (pins dans le Nord). Les densités de stock de bois apparaissent faibles dans les compositions feuillues (chênes méditerranéens), et élevées dans certaines compositions résineuses (mélange sapin/épicéa en montagne). Elles mettent en évidence le rôle des conditions écologiques et de la gestion historique de ces forêts.

Mots-clés : surface forestière, espèces d'arbres, diversité en espèces, partition, stock de bois, ressources forestières

Introduction

La description de grands ensembles forestiers hétérogènes impose leur classification en types emblématiques simplifiés. A l'échelle traditionnelle du massif forestier, cette nécessité s'est incarnée dans la notion de typologie des peuplements forestiers. Ces typologies, fondées sur la composition en essences, la structure des peuplements forestiers, ou leur capital en bois, sont mobilisées en sylviculture et en aménagement (Brucciamachie, 2001). Les typologies de stations forestières, fondées sur l'analyse de l'environnement biophysique et floristique des forêts, et destinées à évaluer la potentialité des milieux pour la production forestière, en sont un autre exemple à l'échelle du massif ou régionale (Brêthes, 1989).

De telles approches restent peu développées à l'échelle du territoire national français, à laquelle s'expriment des enjeux plus récents mais majeurs, tels que (i) l'évaluation et la projection des stocks et flux de carbone forestiers (Wernsdörfer *et al.*, 2012 ; Colin *et al.*, 2017), (ii) la compréhension de la dynamique de long terme d'expansion des forêts (Pignard, 2000, Hervé *et al.*, 2014 ; Denardou *et al.*, 2017), ou (iii) le monitoring de l'impact des changements climatiques, s'inscrivant dans la stratégie européenne pour la bioéconomie (EU, 2015 ; d'Amécourt *et al.*, 2016). Ces enjeux imposent une appréhension exhaustive – et non plus illustrative – des forêts du territoire. L'importance des ressources forestières françaises (16,5 millions d'ha et plus de 2,600 millions de m³, chiffres IGN) dans le paysage européen (4^e surface et 3^e stock de bois sur pied, Forest Europe, 2015) soulignent l'importance du besoin.

La forêt française se singularise cependant par une hétérogénéité record dans le paysage européen, résultant d'une diversité de contextes biogéographiques et d'essences forestières. Les forêts françaises comprennent ainsi 13 des 14 « types forestiers européens » issus d'une typologie continentale (« EFT », Barbati *et al.*, 2014), les plaçant au premier rang de la diversité européenne. Les statistiques d'inventaire forestier indiquent encore que 12 espèces d'arbres sont « essence principale » du peuplement (essence de plus fort couvert) sur des surfaces supérieures à 500,000 ha, et 18 espèces le sont sur plus de 200,000 ha (chiffres IGN). La moitié de la surface forestière est encore occupée par des mélanges d'essences (Morneau *et al.*, 2008).

Cette diversité considérable résulte à la fois d'un milieu physique contrasté, et des trajectoires historiques de gestion (par exemple avec les reboisements résineux et l'introduction de nouvelles essences, Pardé, 1966 ; ou la favorisation des mélanges, Sardin, 2008), conduisant à l'existence d'ensembles forestiers dont la nature et la dynamique peuvent fortement différer. Elle doit donc être prise en compte dans l'examen des enjeux s'exprimant au niveau national. A ces derniers, s'ajoute encore l'impératif de production d'une connaissance intelligible, quantitative et sans biais de la diversité des forêts françaises aux fins plus générales d'appui aux politiques forestières.

A cette échelle, les inventaires forestiers nationaux sont l'outil privilégié de caractérisation des forêts et de leurs milieux (Tomppo *et al.*, 2010). L'inventaire forestier français à caractère

permanent a été créé en 1958 (Bazire, 1984). Trois approches typologiques des couverts forestiers issues du dispositif d'inventaire forestier français existent à ce jour :

(i) la « carte forestière » (IFN, 2008 ; Touzet et Lecordix, 2010) est une description des formations végétales (couverts forestiers, composition) consistant en une discrétisation en unités homogènes de l'information photogrammétrique aérienne en infra-rouge couleur. Cette discrétisation repose sur une nomenclature nationale à 4 niveaux hiérarchiques, dont les deux niveaux les plus fins renseignent sur de grands types de composition et les essences prédominantes (une dizaine d'essences ou groupe d'essences explicites au dernier niveau). L'objectif étant cartographique, il ne donne cependant pas immédiatement une vision synthétique et quantitative de la prédominance de ces types. L'information photogrammétrique en proche infra-rouge couleur est par ailleurs plus grossière que celle issue de la composition des couverts relevée sur les points d'inventaire,

(ii) la classification biophysique du territoire en « Sylvoécorégions » (SER, 91 unités cartographiques, Cavaignac, 2009 ; IFN, 2011) repose sur l'analyse des facteurs climatiques, géologiques, pédologiques et de la flore forestière. Ses objectifs explicites sont de fournir un guide pour le choix des essences ou pour faciliter le suivi des impacts du changement climatique. Le nombre conséquent des SER ne facilite pas leur appropriation aisée, et les compositions dominantes n'y sont pas explicitées. Les SER sont encore regroupées en 11 Grandes Régions Ecologiques (GRECO, Cavaignac, 2009) séparant les principaux massifs montagneux des plaines, en individualisant ces dernières selon le macroclimat (océanique, continental, méditerranéen), et forment une partition géographique plus accessible.

(iii) une typologie des mélanges d'essences et de leur prépondérance sur le territoire national a été enfin réalisée à partir des mesures de couverts effectuées sur les points d'inventaire statistique depuis 2005 (Morneau *et al.*, 2008 ; IGN, 2016). Un type de peuplement élémentaire étant défini par un nombre d'essences et leur identité, c'est au total plus de 1000 types élémentaires qui ont été identifiés sur le territoire, justifiant une démarche de regroupement. Un regroupement opérationnel fait apparaître 117 compositions (désignés dans la suite comme « types de peuplements »), et forme aujourd'hui une typologie de référence pour la ventilation opérationnelle de résultats statistiques de l'inventaire forestier. Cette approche repose sur un effectif encore très conséquent, et reste d'appréhension limitée.

Il reste donc aujourd'hui essentiel de mettre en place des partitions synthétiques des forêts du territoire pour en discrétiser la diversité compositionnelle, en évitant le classique écueil combinatoire associé au nombre des essences, des contextes écologiques, des types de propriété, et en agrégeant les contextes qui n'ont qu'une signification marginale sur le territoire. L'objectif est d'identifier les « idéotypes » forestiers dominants qui les structurent, et pouvant permettre une appréhension efficace et non biaisée de la diversité de ces forêts.

Dans cet article, nous présentons donc un essai de partition hiérarchique des forêts du territoire métropolitain, centré sur la composition en essences des surfaces forestières documentée par l'inventaire forestier national. Le rôle du milieu physique dans la

structuration de cette diversité d'espèces nous a conduits à introduire un premier niveau de partitionnement défini par la typologie de contextes biogéographiques de niveau 1 (GRECO, ou « Grandes Régions Ecologiques »). A un deuxième niveau hiérarchique, une partition des couverts forestiers fondée sur les types de peuplements de l'inventaire forestier (Morneau *et al.*, 2008) complétés par les peuplements purs est développée à partir de règles de décision formelles comprenant : 1) un principe d'agrégation de compositions autour d'essences dominantes qui forment des peuplements purs ou des mélanges avec d'autres essences, 1) un principe de troncature des surfaces forestières fondé sur l'idée du « principe de Pareto » (Dunford *et al.*, 2014) consistant à décrire un maximum de la surface forestière – ici un minimum de 50% – en un minimum de compositions fondées sur les types de peuplements, avec une catégorisation générique au-delà), 3) un principe d'homogénéisation des compositions explicites entre GRECO voisines. L'analyse des stocks de bois (volumes sur pied) associés à ces ensembles est présentée pour contrôler la représentativité de la partition, et comme une première application à l'analyse des ressources en bois.

Matériel et méthodes

Les termes et définitions associés aux typologies utilisées ou développées dans cette contribution sont présentés au **tableau 1**.

[Tableau 1]

Partitions utilisées

Partitions biogéographiques

Une partition cartographique du territoire forestier français en « sylvoécorégions » (SER ; Cavaignac, 2009 ; IFN, 2011) a été développée par l'inventaire forestier national sur la base de facteurs pédologiques, botaniques et climatiques. Cette partition comprend 91 unités, et correspondant à une résolution fine de 6,000 km² par unité. Ces SER sont elles-mêmes rassemblées en une partition d'ordre hiérarchique supérieur définie par les Grandes Régions Ecologiques (GRECO, 11 régions). Ces dernières forment une partition plus accessible à l'entendement, séparant les massifs montagneux (Vosges, Jura, Alpes, Massif central et Pyrénées) des régions de plaine, et pour ces dernières, distinguant des ensembles du Nord du pays suivant un gradient de continentalité (Grand Ouest océanique, Centre-Nord semi-océanique, Grand Est semi-continental), de ceux du Sud du pays (Sud-Ouest océanique, Méditerranée) auxquels s'ajoute la Corse (**figure 1**).

[Figure 1]

Partition en types de peuplements (composition en espèces)

Depuis 2005 (IFN, 2004), une typologie de compositions des peuplements de référence a été établie à partir d'une nouvelle prise de données sur les couverts forestiers, décrits en 1/10^e de taux de couvert libre relatif (TCLR) des essences sur les points de sondage de terrain de l'inventaire (IGN, 2016). Le TCLR correspond au rapport de la surface projetée des houppiers accédant à la lumière d'une essence sur celui de tout le peuplement. Il fournit donc directement l'importance relative d'une essence au niveau de la canopée. Les essences forestières recensées ne sont prises en compte dans la composition des peuplements que si elles excèdent les 2/10^e de TCLR (entre 15 et 25%). Le seuil de 8/10^e définit les peuplements purs. L'essence de plus fort TCLR est dite essence principale, et elle est dite prépondérante lorsqu'elle dépasse un seuil de 2/10^e de TCLR, et qu'aucune autre essence ne dépasse les 2/10^e.

A partir de ces données, et compte tenu de la diversité en essences de la forêt française (70 essences sont recensées par l'inventaire forestier, dont près de la moitié dominant au moins 50,000 ha en France), plus de 1000 types élémentaires de mélanges ont été identifiés, imposant de les organiser en partitions emboîtées hiérarchiquement, et fondées sur l'abondance et la proximité entre types élémentaires. Une présentation de ces partitions emboîtées est donnée dans Morneau *et al.* (2008, voir aussi IGN, 2016).

La typologie de référence utilisée aujourd'hui à l'IFN correspond au premier niveau de regroupement des types élémentaires, et compte ainsi le nombre déjà considérable de 117 types de peuplement fondamentaux (ou « types de peuplements », **Tableau 2**, description exhaustive sur le **online material 1**). Ces types incluent des peuplements purs et des mélanges, et peuvent être complètement spécifiés et informatifs (par exemple mélange « hêtre – chêne sessile »), ou être plus génériques s'ils correspondent à un regroupement de types élémentaires secondaires dans la forêt française (par exemple « mélange chêne(s) – pin(s) », ou encore « autre mélange de résineux à 4 essences »). Ils masquent donc une diversité combinatoire élevée.

[Tableau 2]

Diversité combinatoire et inégalité de prévalence des types de peuplements

Aspect combinatoire

Le croisement des types biogéographiques de niveau 1 (11 GRECO) et des types de peuplements de l'inventaire (117) amène à un nombre de parties théoriques de 1287. De plus, les besoins d'analyse des ressources forestières peuvent amener à introduire d'autres facteurs fondamentaux de stratification, par exemple la destination foncière de la forêt, qui accroît ce nombre de parties théoriques d'un facteur 3 au minimum (forêt domaniale, communale, privée), amenant ce nombre théorique à 3861. L'ensemble des types de peuplements n'existant pas dans toutes les GRECO, le nombre de parties réelles est en réalité moindre (897/1287, ou encore 1861/3861), mais reste à nouveau trop élevé pour être accessible à l'entendement humain. Il y a donc nécessité de contraindre cette partition.

Inégalité de prévalence des types de peuplement

L'examen de l'importance en surface des types de peuplements existant au sein de chaque GRECO montre une forte inégalité dans leur prévalence, qui est générale à l'ensemble des GRECO (elle se retrouve aussi au grain des SER, indiquant que l'inégalité de taille des GRECO n'en est pas la cause profonde). Ainsi, les trois premiers types les plus abondants représentent entre 16.8 % et 46.2 % (moyenne 30%) de la surface forestière des GRECO. Les 50% de types les plus importants représentent entre 81.0 % et 92.7 % (moyenne 87 %) de ces surfaces. Cette inégalité de distribution est illustrée pour la GRECO *Grand-Est semi-continental* (3 premiers types et 50% de premiers types à 19.3% et 92.2% de la surface, respectivement) et la SER *Ardenne Primaire* (3 premiers/50% premiers types à 42.0% et 92.5% de la surface, respectivement) en **figure 2**. Ce phénomène demeure un fait classique en écologie, propre à toute problématique de quantification de diversité en espèces (distributions de diversité-abondance ; McGill *et al.*, 2007).

[Figure 2]

Stratégie et principes de construction de la partition

Les informations de types de peuplements, établis à partir des données de composition collectées pendant la décennie 2006 – 2015 sur les points de sondage temporaires de l'inventaire ont été utilisées. Plusieurs principes de décision leur ont été appliqués pour élaborer la partition des compositions.

Principe de troncature

Une première stratégie de réduction de cette diversité consiste à expliciter les types de compositions dominantes (« compositions synthétiques explicites », ou CSE) d'une GRECO jusqu'à un certain seuil de surface forestière cumulée, et de regrouper les types secondaires en groupes génériques (« compositions synthétiques génériques », ou CSG, **Tableau 1**). C'est ce que nous appelons le *principe de troncature*. Un seuil heuristique minimum à cette explicitation, qui s'est avéré possible à atteindre, est de 50% de la surface forestière d'une GRECO. Par ailleurs, une contrainte quantitative de représentativité des CSE a été introduite, avec un second seuil minimum de 50,000 ha (0,3% de la surface de la forêt française). Les compositions se situant en-deçà de ces critères ont été regroupés selon trois compositions synthétiques génériques : les peuplements de feuillus, les peuplements résineux (à chaque fois purs ou en mélanges), ou peuplements mixtes feuillus/résineux.

Essences « attracteur » et principe d'agrégation

L'examen des types de peuplements de chaque GRECO révèle que certaines essences ligneuses – ou groupes d'essences – dominants ont tendance à participer à des mélanges d'essences (voir aussi Morneau *et al.*, 2008) et se retrouvent dans des types dominants distincts, sans que ces derniers soient fondamentalement différents (au plan de leur gestion courante, de leur histoire, ou de leur dynamique). Ces essences sont qualifiées

d'« attracteur ». C'est emblématiquement le cas du chêne pédonculé dans le Nord de la France (cas de la GRECO Centre-Nord semi-océanique, **Tableau 4**), ou encore des mélanges structurés autour des essences Hêtre/Sapin pectiné/Epicéa commun (cas des GRECO Alpes, Jura et Vosges). Ce constat amène alors à poser un *principe d'agrégation* de ces types, qui forme le second principe d'élaboration de la partition. Un type résultant est ainsi « Chêne pédonculé en peuplement pur ou accompagné de feuillus divers ». Dans cette situation, il n'y a pas de raison d'omettre les compositions associées dont l'importance se situe au-delà des premiers 50% des surfaces forestières des GRECO. Ces compositions ont donc été agrégées aux types dominants.

Principe d'omission

Certains types de peuplements de la nomenclature de l'inventaire forestier national restent par ailleurs peu informatifs, parce qu'ils reposent déjà sur des pré-regroupements de types élémentaires. C'est par exemple le cas de compositions telles que les « feuillus indigènes purs », ou les « autres mélanges résineux à 2 essences ». Dans cette situation et bien qu'étant dominantes, ces compositions ont été rattachées aux CSG (compositions feuillues, résineuses ou mixtes).

Ces deux derniers principes forment une entorse au principe de troncature, puisque d'une part des peuplements situés au-delà d'un seuil de 50% peuvent être intégrés à des CSE, et d'autre part des peuplements situés en deçà du seuil peuvent être intégrés à des CSG.

Principes complémentaires

Deux principes complémentaires ont été mis en œuvre : un *principe d'homogénéisation* des CSE entre GRECO voisines, et un critère d'origine dynamique des peuplements.

Tout d'abord, l'examen des CSE élaborées révèle logiquement des identités ou similitudes entre GRECO voisines au plan géographique ou géophysique. Dans le premier cas, cela a pu conduire à retenir des CSE dont l'importance se situait en deçà des 50,000 ha (cas des peuplements de sapin dans plusieurs massifs de montagne). Dans le second, il est apparu utile d'introduire des CSE à variantes compositionnelles pour en faire ressortir l'unité (cas des hêtraies et hêtraies-chênaies qui peuvent être distinguées dans les plaines du Nord de la France, mais qui sont d'importance insuffisante pour être distinguées dans le Grand-Ouest, **Figure 1 et online material 2**).

Enfin, l'application du principe de l'essence « attracteur » a pu conduire à des hésitations du fait de leur intersection non nulle (par exemple les CSE « chêne-charme » et « chêne pédonculé et feuillus »). Dans ce dernier cas, il nous est apparu utile de faire intervenir un critère d'origine des peuplements, et notamment le mode de gestion en taillis des « charmaies-chênaies » qui les distingue de mélanges de chêne avec d'autre feuillus.

Les raisonnements et principes exposés sont illustrés sur trois exemples.

Exemples de construction des compositions synthétiques explicites

Exemple 1. Compositions synthétiques explicites, génériques, et regroupements en Méditerranée

Le **Tableau 3** présente l'analyse conduite sur la GRECO « Méditerranée », où les types de peuplements de l'inventaire forestier sont classés par surface décroissante, associée à leur pourcentage dans la surface forestière de la GRECO :

- (i) Le *principe d'omission* conduit tout d'abord à écarter le 3^e type de peuplement, dont la composition n'est pas déterminée. Il conduit ensuite à regrouper les types dont la composition n'est pas explicite (en gris dans le tableau) dans les CSG,
- (ii) Le *principe de troncature* amène ensuite à retenir les 4 premiers types de peuplements (chêne vert, chêne pubescent, pin d'Alep, mélange de chênes vert/pubescent), pour un total de 52.6% de la surface couverte. Avec une surface de 97,000 ha pour le 4^e type, ils dépassent tous le seuil minimal de 50,000 ha,
- (iii) L'examen du 5^e type de peuplement (mélange Chêne – Pin d'Alep) retient l'attention, puisque son importance est égale à celle du type précédent. L'examen des types suivants permet de repérer des mélanges similaires (Chêne – Pin sylvestre, Chêne – Pin maritime). Les chênes (vert et pubescent) ont donc une tendance nette à former des mélanges avec les pins dans cette région. En mobilisant le *principe d'agrégation*, on établit donc une nouvelle composition synthétique – le mélange « Chênes – Pins ». Son importance est considérable, puisqu'il occupe alors une surface >150,000 ha, qui le positionne en réalité au 3^e rang des CSE de la GRECO, devant celle définie par le Pin d'Alep.

[Tableau 3]

Exemple 2. Essences attracteurs et regroupements en région Centre-Nord semi-océanique (CNSO)

La construction des compositions synthétiques est illustrée sur cette région, qui a présenté la plus grande difficulté d'organisation, du fait de l'existence de plusieurs essences « attracteur » (**Tableau 4**) :

- (i) Le *principe d'omission* a été à nouveau appliqué concernant les surfaces de composition non déterminée ainsi que les compositions non explicites regroupées dans les compositions synthétiques génériques,
- (ii) L'analyse des compositions de la GRECO montre qu'elles sont en nombre considérable, et que le *principe de troncature* est pris en défaut, puisque l'importance relative des premières compositions s'effondre très rapidement, rendant le seuil des 50% de surface inatteignable,
- (iii) La première composition ne pose pas de difficulté à isoler (peuplements de Chêne sessile pour 427,000 ha et 14.8%). La seconde correspond au chêne pédonculé. Les compositions suivantes montrent que cette espèce forme de nombreux mélanges avec des feuillus (Chêne sessile, Bouleau, Châtaignier, Chêne pubescent, souvent accompagnés par d'autres feuillus). On applique donc le *principe d'agrégation*, afin de former un type « Chêne pédonculé pur ou

avec feuillus », qui occupera finalement le premier rang d'importance dans la région (536,000 ha, 18.6%),

(iv) La composition suivante la plus significative est formée du mélange Charme – Chêne pédonculé (89,000 ha). Les compositions suivantes comprennent 8 autres compositions associant le charme, fondées systématiquement sur des chênes (et d'autres feuillus). A nouveau, le *principe d'agrégation* est mobilisé autour de cette essence attracteur, et conduit à identifier un type « Charme / Chênes et autres feuillus », qui représente finalement 289,000 ha pour 9,9% de la surface (4^e rang de la région). Il faut ici remarquer que la formation de ce groupe impose de soustraire le mélange « Charme – Chêne pédonculé » du regroupement précédent, puisqu'il présente une intersection non vide avec ces deux regroupements,

(v) Un raisonnement semblable est appliqué au Frêne commun (59,000 ha en peuplements purs), qui forme lui aussi de nombreux mélanges avec des feuillus, dont la moitié seulement associent des chênes. Cela conduit à retenir une composition synthétique « Frêne pur ou avec feuillus », qui représente 326,000 ha pour 11.3% de la surface (3^e rang de la région). A nouveau, le mélange Frêne – Chêne pédonculé a été soustrait du premier regroupement. En revanche, il n'existe pas de mélange Frêne – Charme identifié.

(vi) Le seuil du principe de troncature est atteint en pratique, avec 54.6% de la surface décrite. Cependant, la composition suivante correspond aux peuplements de Hêtre commun dont la surface est significative (55,000 ha), laquelle est donc retenue. L'analyse montre de plus que le hêtre se retrouve associé dans 5 autres types de mélanges avec des chênes et d'autres feuillus, et suggère une nouvelle CSE qui peut permettre de faire progresser la description de la surface. Ainsi est établi un type « Hêtre pur ou avec chênes (et autres feuillus) », qui représente 103,000 ha (3.5% de la région) et occupe le 5^e rang de ces compositions synthétiques. A nouveau, le type Hêtre – Chêne pédonculé a été soustrait du premier regroupement.

[Tableau 4]

Exemple 3. Homogénéisation entre GRECO (online material 2)

La mise en œuvre du *principe d'homogénéisation* peut être illustrée par quelques situations :

(i) Composition synthétique explicite des « pins ». Ce regroupement de compositions exclusivement pures (Pins laricio, sylvestre, maritime) a été initialement retenu comme CSE dans la GRECO du Grand-Ouest (55,000 ha), afin de satisfaire au *principe de troncature*. Comme il vient d'être exposé, le seuil de 50% de surface explicitée était atteint dans la GRECO Centre-Nord en retenant des compositions pures et des regroupements autour d'essences « attracteur ». Néanmoins, cette CSE a été identifiée dans cette dernière GRECO, indiquant une similarité sylvicole avec la première. Comme elle atteint de plus une surface plus significative (185,000 ha), ce *principe d'homogénéisation* amène à identifier la composition synthétique des pins dans cette seconde région,

(ii) Composition synthétique « hêtre – chênes ». Ce regroupement de compositions a été initialement identifié dans les GRECO Centre-Nord et Grand-Est où il est très significatif, à côté d'une composition pure en hêtre. Dans les Vosges d'une part, ce mélange a été retenu bien qu'il n'atteigne pas les 50,000 ha (37,000 ha), d'une part parce que la GRECO est plus restreinte en surface et que le seuil associé au *principe de troncature* amène à en tenir compte, et d'autre part parce que ce mélange apparaît en réalité comme étant emblématique de l'ensemble du Nord et de l'Est du pays. Dans la GRECO Grand-Ouest, ce mélange est à nouveau identifié parmi les CSE. Bien que le hêtre en peuplement pur existe dans cette région, il est cette fois-ci trop restreint en théorie (11,000 ha) pour être retenu. Le principe d'homogénéisation entre régions nous amène cependant à le retenir, en le fusionnant à la composition synthétique « hêtre / chênes » sous forme de variante (« hêtre pur ou avec chênes »). Ceci permet de traduire la réalité de la présence du hêtre en peuplements purs ou mélangés au chêne dans l'ensemble de ces GRECO du Nord.

Résultats

Propriétés quantitatives générales de la partition

Les propriétés quantitatives de cette partition sont présentées au **Tableau 5**. L'identification et la quantification des différentes CSE et CSG par GRECO est reportée en **online material 2**.

[Tableau 5]

L'objectif initial d'explicitation des compositions synthétiques explicites (CSE) sur une étendue >50% de la surface forestière a pu être atteint dans chaque GRECO (>55% dans 9/11 GRECO et >60% dans 6/11 GRECO, **Figure 2**) comme au plan national (61,6% de la surface forestière décrite par des CSE). Un tiers (30.3%) de cette surface est décrit par les compositions synthétiques génériques (CSG). Environ 8% de la surface forestière reste de composition indéterminée, du fait d'un degré d'ouverture des peuplements qui ne permet pas une description des taux de couvert (au seuil de 2/10^e), et qui permet de situer l'importance de ces forêts ouvertes, auxquelles les GRECO les plus contributrices sont le Massif Central, le Sud-Ouest Océanique et la Méditerranée, pour une surface dépassant les 700,000 ha.

L'analyse de la couverture du stock de bois sur pied en volume selon les CSE de cette partition est encore plus favorable, puisqu'un seuil de 60% du stock est atteint dans 10/11 GRECO (et 70% dans 3/11 GRECO, **Figure 3**), pour une couverture du stock sur pied total de 65,9%. Tandis que les CSG atteignent le tiers du stock sur pied (33.7%), le stock sur pied de composition indéterminée atteint le niveau anecdotique de 0.4%, et souligne que ces forêts ouvertes ne comportent qu'une quantité de bois marginale.

[Figure 3]

Le nombre de CSE permettant d'atteindre le seuil de 50% de la surface forestière d'une GRECO est en moyenne de 6.4, et est compris entre 4 (Grand-Ouest, Sud-Ouest Océanique,

et Corse, traduisant la dominance d'un petit nombre de CSE) et 11 (le Massif Central est de ce point de vue la GRECO « record » en termes de diversité de CSE, avec des types à la fois feuillus et résineux qui traduisent la mise en valeur historique du massif par des boisements (**Tableau 5, online material 2**). Le coefficient de corrélation entre surface forestière totale des GRECO et nombre de CSE est de 0.42 en moyenne, indiquant l'existence d'un lien entre surface forestière décrite et diversité des compositions. La surface forestière moyenne d'une CSE est de 141,000 ha, ce qui indique une bonne représentativité.

Il existe une différence du nombre de types de CSE entre GRECO de plaine (5.4 CSE en moyenne, corrélation surface / nombre de CSE = 0.38) et de montagne (8.2 CSE en moyenne, corrélation = 0.89), traduisant une diversité supérieure en montagne. La surface moyenne décrite par une CSE est de 220,000 ha en plaine, contre 76,000 ha en montagne. Au total, 29 CSE sont identifiées, traduisant une efficacité de la partition proposée au regard de l'écueil combinatoire.

Compositions synthétiques explicites structurant la partition

Eléments généraux

Les 29 CSE sont décrites et codées dans le **Tableau 6**. Leur répartition est à la faveur des compositions feuillues (15, contre 11 CSE résineuses), et trois compositions mixtes (mélanges de Pin sylvestre et espèces feuillues, M1 : mélanges centrés sur le Hêtre commun associé au Sapin pectiné ou à l'Epicéa commun, M2 ; mélanges chênes-pins, M3). Parmi les CSE feuillues, deux sont décrites avec des variantes : i) celles dominées par le Chêne pédonculé, où des peuplements de Chêne pédonculé pur (121,000 ha, F1.3) ou avec feuillus (319,000 ha, F1.2) ont été distingués pour le seul Massif Central, là où ils ont été fusionnés en un type générique pour les autres GRECO (F1.1, GRECO de plaines du Nord du pays, Sud-Ouest océanique et Pyrénées), ii) celles dominées par le Hêtre, où des peuplements de Hêtre pur ont pu être distingués pour les massifs montagneux (Vosges, Jura, Massif Central, Alpes, Pyrénées) et les plaines du Nord et de l'Est (F6.1), là où ils ont été fusionnés en un type associant les chênes dans la région Grand-Ouest (F6.3).

[Tableau 6]

Surfaces forestières associées aux CSE

La surface totale décrite par une CSE feuillue est comprise entre 56,000 ha (Hêtre pur ou avec des chênes dans la GRECO Grand-Ouest, CSE F6.3) et 1,300,000 ha (Chêne pédonculé pur ou avec feuillus dans les GRECO de plaine du Nord ainsi que dans le Sud-Ouest et les Pyrénées, F1.1). La surface totale décrite par une CSE résineuse est comprise entre 23,000 ha (Pin laricio en Corse, R11) et plus de 600,000 ha (Pin maritime dans le Sud-Ouest et en Corse, R1). La CSE R11 est ainsi la seule à faire entorse au principe d'une étendue minimale de 50,000 ha, du fait de la petitesse de la région Corse, et du caractère emblématique du Pin laricio dans cette zone. En moyenne, l'étendue d'une CSE est >280,000 ha, celle d'une CSE

feuillue >350,000 ha, celle d'une CSE résineuse >210,000 ha, celle d'une CSE mixte >220,000 ha, et celle d'une CSG >800,000 ha, ce qui souligne leur caractère significatif et représentatif à l'échelle de la forêt métropolitaine.

Fréquence des CSE sur le territoire forestier

Le nombre d'occurrences d'une CSE sur le territoire est très variable, et est compris entre 1 et 7 (cas du Hêtre pur dans les massifs montagneux et dans certaines plaines, F6.1), pour un nombre moyen d'occurrences de 4.5. Deux faits doivent être soulignés : i) 13 CSE présentent une seule occurrence, ce qui vient à nouveau souligner la diversité et l'identité contextuelle en espèces ligneuses de la forêt française, sur des ensembles forestiers très significatifs en surface, ii) respectivement 7/4 CSE présentent 2/4 occurrences, ce qui traduit également une similarité compositionnelle de GRECO voisines (**Tableau 6, Figure 1**), que l'on a cherché à expliciter autant que possible par homogénéisation entre régions.

Analyse des compositions en espèce des CSE

Au plan de la composition en espèces, plusieurs constats émergent : i) tandis que les CSE résineuses correspondent en quasi-totalité à des peuplements purs (seule la sapinière-pessière est explicitée, pour 64,000 ha dans les Vosges et le Jura, R9), 9/13 CSE feuillues correspondent à des mélanges feuillus dominés par quelques essences, ii) les peuplements à base de chênes sont très prédominants au sein des CSE feuillues, avec seulement 3 types fondés sur d'autres essences (Hêtre commun, Châtaignier et Frêne commun), iii) le comportement « attracteur » de trois essences en particulier (leur association effective dans des mélanges avec un large nombre d'essences sur de grandes surfaces) est nettement identifié : ainsi le Chêne pédonculé est une essence dominante sur >1,600,000 ha, le Hêtre commun sur >1,100,000 ha, et le Frêne commun sur >800,000 ha. A l'inverse, la présence des Chênes sessile et pubescent dans des peuplements essentiellement purs est à remarquer.

Emblèmes forestiers et faits moins attendus

L'analyse des CSE à occurrence unique ou double fait ressortir bien des emblèmes identitaires régionaux de la forêt française, parmi lesquels peuvent être cités : le mélange de Hêtre et de chênes dans les plaines du Nord et de l'Est du pays (>600,000 ha, 95 hm³), le Pin maritime dans le Sud-Ouest et en Corse (>600,000 ha), le Chêne vert en Méditerranée et en Corse (>300,000 ha), le Douglas et le Châtaignier dans le Massif Central (170,000 ha et 130,000 ha, 55 et 20 hm³), le Pin d'Alep en Méditerranée (près de 150,000 ha), le mélange Sapin pectiné/Épicéa commun dans les Vosges et le Jura (>60,000 ha), enfin le Mélèze (>60,000 ha) et le Pin noir (>50,000 ha) dans les Alpes. Elle révèle aussi des faits moins attendus, tels que l'occurrence des pins (Pin maritime, Pin sylvestre, Pin laricio, et Pin noir (>240,000 ha, 115 hm³) dans les régions de l'Ouest et du Nord de la France qui ont fait l'objet de boisements résineux, ou celle du Charme commun accompagné de chênes dans le Nord et l'Est du pays (>630,000 ha, 47 hm³), c'est-à-dire d'une essence qui a historiquement contribué à la strate de

taillis des peuplements. Les volumes de bois associés à ces compositions attestent du caractère constitué de ces ressources.

L'analyse des CSE à forte occurrence fait quant à elle ressortir des emblèmes de contextes climatiques larges, parmi lesquels peuvent être cités : le Chêne pédonculé dans les plaines du Nord et du Sud-Ouest ainsi que dans les massifs forestiers occidentaux (>1,700,000 ha), le Hêtre commun dans l'ensemble des massifs et dans les plaines du Nord et de l'Est (600,000 ha), ainsi que le Sapin pectiné et l'Epicéa commun dans les massifs des Vosges, du Jura, du Massif Central, des Pyrénées ou Alpes (260,000 et 240,000 ha). L'occurrence du Chêne pubescent dans l'ensemble de la moitié Sud du pays est à souligner (>800,000 ha, 64 hm³), ainsi que du Frêne commun dans les plaines du Nord-Est, dans le Jura et les Pyrénées (>800,000 ha, 145 hm³) dont la dynamique est avérée. A nouveau, les volumes de bois associés à ces compositions sont très significatifs.

Idéalisation de composition des forêts françaises : agrégation des compositions synthétiques explicites

Afin de proposer une lecture plus synthétique encore de la composition des forêts du territoire, les 29 CSE (**Tableau 6**) ont été agrégées (« compositions synthétiques agrégées », CSA) selon trois directions : i) en regroupant des CSE qui forment des variantes (par exemple F1.2 et F1.3 autour du chêne pédonculé), ii) en regroupant des CSE d'espèces qui se rencontrent aussi en mélanges, et dans un contexte régional donné (par exemple F3, F7.1/F7.2 et F9 autour des chênes méridionaux, c'est-à-dire le Chêne pubescent et Chêne vert dans un domaine méditerranéen), iii) et en regroupant des CSE dont les espèces forment un groupe botanique étroit au regard de la diversité des essences françaises, comme c'est le cas autour du genre Pinus et des mélanges associés (R1, R2, R5, R7, R10, R11). L'agrégation a ainsi conduit à identifier 15 CSA auxquelles les CSG ont été adjointes (**Tableau 7**). La distribution de ces compositions dans un plan défini par leur surface et leur stock de bois est présentée en **Figure 4**.

[Tableau 7]

[Figure 4]

CSA prépondérantes

Ces CSA couvrent des domaines conséquents, puisqu'elles représentent en moyenne une surface >800,000 ha chacune, pour un stock de bois moyen de près de 150 hm³.

Quatre CSA dépassent chacune le million d'hectares, et dominent largement les suivantes : il s'agit des surfaces occupées i) par des espèces feuillues diverses, ii) par le Chêne pédonculé et son cortège d'espèces feuillues, iii) par les espèces de pins, iv) enfin celles occupées par les chênes méridionaux et leurs cortèges feuillus. L'occurrence au premier rang de la CSG « divers feuillus » est à souligner. A elles seules, ces quatre compositions représentent, dans

les zones où elles sont explicitées, 40% du stock de bois total de la forêt française (>1/4 si on ne retient que les trois CSA).

De façon nette, les CSA résineuses sont peu nombreuses et moins étendues (à l'exception des pins). A nouveau, la CSG « divers résineux » occupe un rang élevé (le second, avec une surface >850,000 ha). Les surfaces occupées par le Sapin pectiné, l'Epicéa commun ou leur mélange demeurent ainsi sous les 600,000 ha et n'occupent que le 11^e rang de ces CSA. Les compositions formées par le Douglas ou le Mélèze en occupent les tous derniers rangs. Ces éléments mettent nettement en évidence le caractère feuillu de la forêt française, ainsi que la diversité élevée en espèces ligneuses qui se matérialise dans l'importance des compositions génériques.

Stock de bois sur pied

La mise en correspondance du stock sur pied et des surfaces incluses dans ces compositions agrégées (**Tableau 7, Figure 4**) montrent une régularité de distribution autour du stock moyen à l'hectare des forêts françaises. Plusieurs exceptions notables sont toutefois à relever : i) au rang des anomalies négatives les plus visibles, les peuplements formés de feuillus divers, de chênes méridionaux puis de pins, révèlent les capitalisations en volume par unité de surface les plus faibles. En termes de densité de stock à l'hectare (**Figure 5**), les cortèges de chênes méditerranéens et les mélanges chênes/pins atteignent des stocks de l'ordre de 70 m³/ha, ii) à l'inverse, les peuplements formés de résineux divers, ceux formés de Sapin et/ou d'Epicéa montrent une capitalisation élevée en volume. L'analyse de la densité de stock montre que les compositions dominées par le Sapin et l'Epicéa atteignent plus du double de la densité moyenne des CSE/CSG (178 m³/ha), et que les peuplements de Douglas et divers résineux dépassent les 300 m³/ha. A l'exception des pins, le lien existant entre composition dominante (feuillue ou résineuse) et le degré de capitalisation en volume sur pied est à souligner.

[Figure 5]

Discussion

L'objectif des travaux était de proposer une partition des forêts françaises métropolitaine fondée sur leur composition ligneuse, avec une stratification selon leur contexte biogéographique. Cette partition devait obéir au double impératif d'être exhaustive et précise, tout en restant suffisamment intelligible pour pouvoir servir de référentiel. L'idée originale qui a dirigé l'approche repose sur l'exploitation de la diminution très rapide et systématique de l'occurrence des compositions ligneuses au sein de domaines géographiques donnés (courbes diversité-abondance, **Figure 2**), permettant de décrire une surface représentative en un minimum de compositions synthétiques explicites (CSE), selon une forme de « principe de

Pareto ». La seconde idée a été de regrouper les longues queues de distribution des compositions restantes en un nombre très restreint de compositions synthétiques génériques (**Tableau 6**) afin d'atteindre une description exhaustive.

Approche méthodologique

La construction de la partition s'est fondée sur la typologie des types de peuplements de l'inventaire forestier (Morneau *et al.*, 2008) résultant de l'analyse des taux de couvert libre des espèces, mesurés sur les points de sondage temporaire de l'inventaire forestier. A ce titre, elle constitue une nouvelle valorisation d'un effort de collecte qui reste considérable (de l'ordre de 6,000 points par an). Bien que cette typologie de base ait été établie en priorisant des compositions de grande importance surfacique, avec une attention portée aux espèces (même référence), il serait utile de vérifier sa robustesse en la comparant à une méthode statistique de classification des types élémentaires (>1000) associée à une méthode de classement probabiliste pour les inventaires annuels ultérieurement réalisés.

La présente partition s'est appuyée sur plusieurs principes formels permettant de borner les explorations (principes de troncature, d'agrégation, d'homogénéisation, d'omission) que l'on a objectivés et illustrés, et sur certains critères quantitatifs tels que le choix d'explicitier au moins 50% de la surface de chaque GRECO en compositions synthétiques explicites (impératif de représentativité), avec des unités compositionnelles qui dépassent les 50,000 ha chacune.

Si ces choix sont raisonnés, ils conservent une dimension subjective, dont le rôle peut s'accroître avec la complexité des compositions (cas de la GRECO Centre-Nord, **Tableau 4**). Le seuil de 50% des surfaces forestières a été a posteriori dépassé (**Tableau 5**), suggérant une possibilité de progrès. Cependant, le nombre déjà élevé de CSE nécessaires dans certaines régions (jusqu'à 8 dans les Pyrénées et 11 dans le Massif Central, pour une surface demeurant inférieure à 60%), pour des surfaces associées dont les plus petites avoisinent les 50,000 ha (0,03% de la surface totale) nous semble ne pas devoir être dépassé fortement.

L'importance du stock de bois sur pied a été contrôlée en parallèle des surfaces, afin i) de s'assurer que ne seraient pas omises des compositions de faible importance qui seraient fortement capitalisées, puis ii) de conduire une analyse conjointe de ces quantités. En réalité, ce risque n'existe pas (voir compositions génériques, **Figure 4a**). De même, les surfaces forestières dont la composition n'est pas déterminée par l'inventaire forestier (**Tableau 5**) reflètent un stock insignifiant, qui rend leur omission sans conséquence.

Enfin, cette première analyse pourrait être à l'avenir complétée par l'adjonction d'autres facteurs de stratification des forêts, tels que la destination foncière des surfaces forestières, ou leur soumission à un plan simple de gestion (PSG) pour les forêts privées (Boutefeu, 2005), qui peut être de premier intérêt pour la formulation de politiques de gestion (Galbert *et al.*, 2015). Si cela ne pose pas de difficulté majeure au plan technique, la multiplicité de ces facteurs nous a conduits à une présentation qui demeure simple et en démontre la faisabilité.

Analyse quantitative et efficacité de la partition

Les trois compositions spécifiques génériques ou CSG (divers feuillus, résineux et mixtes) représentent 30% de la surface forestière métropolitaine, dont la moitié est couverte par la seule CSG « divers feuillus » (**Tableau 5**), et soulignent l'importance de la diversité ligneuse structurée par ces cortèges. Chacune de ces CSG occupe par ailleurs le premier rang d'importance dans sa classe de composition botanique, devant les CSE (**Tableau 6**). Les CSG feuillues et résineuses occupent par ailleurs les deux premiers rangs absolus, avec la CSE « chêne pédonculé pur ou avec feuillus » (**Tableau 5**). Ces chiffres démontrent que cette fraction significative des forêts françaises ne peut être réduite aux 29 CSE identifiées, et en soulignent la diversité ligneuse tous cortèges confondus.

La surface des forêts ouvertes dont la composition est indéterminée est conséquente (>1,200,000 ha), bien que le stock de bois sur pied associé y soit négligeable (**Tableau 5**). La géographie de ces forêts ouvertes, dont les surfaces les plus significatives occupent la moitié Sud du pays (Sud-Ouest, Méditerranée, Massif Central pour une surface >700,000 ha), et avec une part relative au voisinage de 15% (Sud-Ouest, Méditerranée, Corse), désigne les régions marquées par l'expansion spontanée des forêts sur des terrains agricoles abandonnés (Pignard, 2000 ; Galbert *et al.*, 2015 ; Denardou *et al.*, 2017). Bien que la composition de ces nouvelles forêts ne soit par définition par connue, une analyse temporelle plus profonde fondée sur les inventaires forestiers anciens et la statistique forestière Daubrée (1908) montre que les surfaces dominées par les essences feuillues ont progressé deux fois plus vite que celles dominées par des résineux depuis un siècle (4 et 2 millions d'ha respectivement, pour une composition globale inchangée, Denardou *et al.*, 2017), alors même que la seconde était soutenue par des programmes de boisement volontaires (par exemple par le Fonds Forestier National, FFN ; Pardé, 1966). Cette progression ainsi que la géographie de ces changements suggèrent que ces surfaces sont essentiellement feuillues. Alors que les forêts françaises représentent le premier stock feuillu européen, la capitalisation future en bois de ces nouvelles surfaces ne pourra qu'en accroître l'importance. Ce dernier fait est encore confirmé (**Tableau 6, Figure 4a**) par le fait que la CSG « divers feuillus » est moins capitalisée qu'en moyenne, là où la CSG « résineux » l'est plus qu'en moyenne (rôles des boisements en plantations).

Comme indiqué précédemment, le dépassement du seuil de 50% des surfaces couvertes par des CSE a pu être atteint dans toutes les GRECO (**Tableau 5**), et se traduit par une prise en compte encore supérieure du niveau de stock sur pied (**Figure 3**). Avec un nombre moyen de 6.4 CSE/GRECO (allant de 4 à 11), la maniabilité de cette partition est démontrée. Le nombre de CSE plus élevé dans les GRECO de montagne (8.2 en moyenne contre 5.4 en plaine) pour une proportion de surface couverte plus faible (**Figure 3**) traduit une double particularité de ces massifs. D'une part, la variabilité altitudinale des conditions climatiques est telle qu'elle favorise un étagement de la végétation et un enrichissement de la diversité ligneuse, avec une occurrence très nette de CSE résineuses (cas des compositions fondées sur l'Epicéa, le Sapin

pectiné, le Pin sylvestre) en plus de CSE feuillues qui se trouvent dans ces domaines (**Tableau 6**). D'autre part, on ne peut ignorer le rôle de programmes de boisement de montagne, qui ont conduit à introduire ou à privilégier l'expansion de plusieurs essences résineuses sur le territoire. Des exemples sont donnés par le Mélèze et le Pin noir dans les programmes de boisement de Restauration des Terrains de Montagne, RTM, dans les Alpes (Saillet, 1991), de l'introduction du Douglas et de l'extension de l'Épicéa commun dans le massif central avec le FFN (Pardé, 1966 ; Guitton & Riou-Nivert, 1987), ou plus récemment de l'utilisation d'espèces de pins en reboisement dans les plaines du Nord-Ouest (**Tableau 6**). Le cas du massif central est emblématique d'une mise en valeur forestière accroissant la diversité ligneuse à un niveau régional. L'identification de ces ressources en bois (stock sur pied) dans cette partition indique qu'elles sont à un état de constitution avancé, et peut cacher par contraste d'autres ensembles moins développés. Par exemple, le Pin laricio utilisé comme essence de reboisement dans le Centre de la France, pourtant emblématique, occupe une surface trop faible pour être explicitée dans l'analyse (13,000 ha en GRECO Grand-Ouest).

Analyse des compositions synthétiques de la partition, constats attendus et originaux

L'analyse quantitative de ces CSE (**Tableau 6**) rappelle que les forêts françaises sont majoritairement feuillues, et que les espèces de chênes de tout tempérament climatique y jouent un rôle structurant. Bien que l'origine de ce constat sorte du champ de cette analyse quantitative, il est permis de rappeler que les chênes sont des essences aptes à rejeter de souche (Boppe, 1889) et qu'elles ont été à ce titre sélectionnées sur des horizons pluriséculaires par la pratique du taillis et taillis-sous-futaie (Hüffel, 1926) pour l'approvisionnement en bois de chauffage domestique ou industriel (Badré, 1992). Dans les plaines du Nord, ce système a pu conduire à une réduction de la prévalence du Hêtre, comme le suggère une analyse de son autoécologie, démontrant que son potentiel de croissance n'est pas le facteur limitant en limite méridionale de son aire (Seynave *et al.*, 2008).

Dans des contextes de moyenne et de haute montagne, le Hêtre occupe une même position privilégiée (il rejette de souche aux environs de 1000m d'altitude ; Boppe, 1889) et a joué ce rôle d'approvisionnement en bois énergie pour les populations de montagne (Davasse, 1992 ; Coppini & Hermanin, 2007 en Italie), tandis que le Châtaignier devient visible dans le massif central et le Sud-Ouest. L'identification du Charme commun comme essence structurante de CSE dans le Nord et l'Est du pays est à remarquer, puisqu'elle forme ordinairement une essence d'accompagnement des taillis de chêne. Son caractère dominant dans les couverts de peuplements de ces régions suggère que ces populations ont atteint un stade de maturité. Ce constat peut être relié à l'effort historique séminal de conversion des taillis en futaie dans ces régions (Hüffel, 1926 ; Plaisance, 1966). Le fait semble encore confirmé par la capitalisation en volume sur pied de la CSE associée au charme dans la moyenne nationale (**Figure 4b**), là où on pourrait l'attendre en deçà (taillis moins capitalisés).

L'opposition entre le caractère préférentiellement mélangé des peuplements feuillus (Morneau *et al.*, 2008) et monospécifique des peuplements résineux (**Tableau 6**) met également en évidence le contraste existant entre des forêts feuillues à l'évolution semi-naturelle (rôle de la régénération) et certaines forêts résineuses nouvelles installées lors de boisements artificiels depuis le XIX^{ème} siècle, dont le Pin maritime, l'Epicéa commun, le Douglas, le Mélèze et les pins dans le Nord-Ouest sont représentatifs. Concernant les feuillus, le Chêne sessile fait exception par son degré de pureté, qui peut être la résultante d'une sélection fondée sur la valeur de son bois (Jarret, 2004). Il ne faut toutefois pas négliger l'importance de compositions résineuses plus naturelles, telles que la sapinière-pessière dans les Vosges et le Jura, les peuplements de Pin laricio en Corse ou de Pin d'Alep en Méditerranée. De façon nette, le caractère plus ancien et d'évolution plus spontanée de certaines essences résineuses se traduit encore par l'occurrence de compositions mélangées, tels que la hêtraie-sapinière/pessière dans les massifs de l'Est, les mélanges chênes-pins méditerranéens, ou le mélange de Pin sylvestre et feuillus dans le Massif Central et les Alpes. Pour ce dernier cependant, le rôle du reboisement de peuplements feuillus appauvris par le dispositif du Fonds Forestier National et dès le XIX^{ème} siècle est attesté (Lacaze, 1964).

De façon essentielle, l'analyse fait enfin ressortir les différences existant entre une description statistique représentative de la forêt telle qu'elle est permise par un inventaire forestier national (IFN, 2004), et les représentations de la culture collective. Ainsi, plusieurs ensembles réputés emblématiques de la forêt française (Bazire et Gadant, 1991) sont trop restreints pour être identifiés dans cette partition, ou y jouent un rôle marginal (exemples de la hêtraie Normande, de la pineraie de Corse, ou du mélézin alpin). A l'inverse, la prévalence du Chêne pubescent dans toute une moitié Sud du pays, des mélanges associés au Frêne commun dans plusieurs régions, ou des pins dans le Nord-Ouest sont moins attendus.

Ces constats plus originaux sont particulièrement explicites au niveau plus agrégé des CSA (**Tableau 7**), où plusieurs faits sont à relever : i) les mélanges feuillus associés au Chêne pédonculé et les pineraies sont les deux ensembles les plus étendus des forêts françaises (environ 1.7 Mha chacun), ii) ils sont suivis par les mélanges feuillus associés aux chênes méditerranéens puis au Frêne (1.3 Mha et 800,000 ha respectivement), iii) les peuplements de Chêne sessile ne viennent qu'après ces ensembles. En conséquence, l'intérêt d'une telle partition est bien de pouvoir objectiver les ensembles compositionnels les plus significatifs de la ressource forestière, et de corriger de tels biais de perception. A ce titre, les données collectées par l'inventaire forestier national sont de premier intérêt.

Relation entre prévalence des compositions synthétiques en surface forestière et en stock de bois sur pied

La partition des forêts françaises a été prioritairement ciblée sur leurs surfaces, avec l'objectif de segmentation quantitative de l'occupation des territoires forestiers. Dans une logique d'évaluation des ressources forestières, le stock de bois sur pied a été utilisé comme variable

auxiliaire, afin de contrôler que cette approche n'occulte pas des stocks significatifs, puis d'analyser la relation entre surfaces et stocks de bois partitionnés pour aborder la problématique de capitalisation des forêts (moyenne nationale de 162 m³/ha, **Tableau 5**).

S'agissant du risque d'occultation des stocks de bois, les principaux enseignements en sont les suivants (**Tableau 5** et **Figure 3**) :

i) tandis que la surface de composition indéterminée est très significative (>1.2 Mha pour 8% de la surface), le stock de bois recensable associé, par définition faible s'agissant de forêts « ouvertes », est en réalité négligeable (0.003% du stock) et atteint 6.4 m³/ha. Ces forêts ouvertes ont deux origines, soit qu'il s'agisse de forêts pauvres (contextes nutritionnels ou géophysiques médiocres, limites altitudinales de la végétation), soit qu'il s'agisse de forêts « nouvelles » progressant sur des territoires agricoles (Lepart *et al.*, 2001 ; Denardou *et al.*, 2017). Tandis qu'il n'est pas possible de faire la part de ces deux origines, la seconde plaide pour une contribution future à l'augmentation de stock sur pied,

ii) de façon systématique, la part de stock de bois sur pied couverte par les CSE est supérieure à celle des surfaces (près de 2/3 du stock total, **Tableaux 5 et 6**), avec une capitalisation moyenne de 178.5m³/ha, supérieure à la moyenne nationale. Cela s'explique au plan quantitatif par la moindre capitalisation dans la CSG « divers feuillus » (140.5 m³/ha, **Tableau 5**) qui est représentée dans toutes les GRECO (**Tableau 6**) pour une part moyenne de 17% des surfaces, ainsi que celle de « composition indéterminée » déjà évoquée. Au plan sylvicole, l'interprétation est à rechercher dans le fait que les CSE correspondent à des forte prévalences et des compositions simples (espèce unique, mélanges de deux espèces, ou cortège associé à une espèce dominante), et nécessairement à des forêts qui ont été et/ou demeurent mises en valeur par la gestion forestière. En favorisant la régénération ou l'action de plantation, des structures de peuplement élevées (futaie), et en consacrant l'amélioration des peuplements par la sélection des arbres éclaircis, cette dernière contribue logiquement à un accroissement du stock sur pied. La forêt domaniale, qui est par soumission à l'aménagement forestier emblématique d'une mise en valeur ancienne et continue, se capitalise aujourd'hui ainsi à un niveau moyen de 180 m³/ha, Denardou *et al.*, 2017). De ces points de vue, la partition proposée est également efficace pour l'appréhension et la catégorisation des ressources forestières du territoire.

L'examen des capitalisations en bois des CSE et CSG (**Tableau 6**) a par ailleurs révélé des déviations marquées de certaines compositions par rapport au stock moyen à l'hectare des forêts françaises (**Figure 5**), structurées selon les classes botaniques. La position dominante des CSE résineuses associées à l'Epicéa commun, le Sapin pectiné (y compris le mélange avec le Hêtre pour ces dernières), le Douglas et les résineux divers (>300 m³/ha) interpelle, et peut s'expliquer par deux facteurs non exclusifs : la capitalisation sur pied de peuplements installés lors des programmes de boisement comme le FFN (Epicéa, Douglas, résineux divers) dont la valorisation n'a pas encore été conduite (Galbert *et al.*, 2015), l'insuffisante exploitation de peuplements croissant de façon privilégiée en contextes de montagne peu

accessibles (cas de la sapinière). Les compositions synthétiques les moins capitalisées concernent les chênes méditerranéens et leurs cortèges (70 m³/ha), ainsi que les pins, en association ou non avec des feuillus (**Figure 5**), avec des causes potentielles multiples : i) d'une part ces essences sont héliophiles et à ce titre, plus intolérantes à des conditions de densité élevée. La capitalisation des CSE fondées sur le Chêne sessile et pédonculé tendent cependant à invalider le raisonnement pour les chênes, ii) d'autre part les chênes méditerranéens croissent de façon significative en peuplements de taillis, par nature faiblement capitalisés (Quézel et Bonin, 1980), iii) enfin plusieurs de ces CSE se situent dans des régions méridionales (Pin sylvestre et feuillus, chênes méditerranéens, chênes/pins de la GRECO Méditerranée) où des conditions de croissance plus défavorables peuvent limiter leur capitalisation. Enfin, la position de moindre capitalisation des feuillus divers désigne la progression marquée des nouvelles forêts feuillues.

En résumé, la forte structuration de la densité de stock sur pied trouve son origine dans des phénomènes historiques politiques (boisements résineux) et naturels (feuillus et pins) qui mettent en évidence un contraste : alors que la forêt française et son stock sont majoritairement feuillus, les densités de stock les plus élevées sont localement résineuses. Les compositions fondées sur les pins font exception.

Conclusions

Il est possible de partitionner la surface des forêts françaises (>16 Mha) en un petit nombre de compositions synthétiques explicites et génériques (32 au total, **Tableau 6**), réductible à 18 compositions agrégées (**Tableau 7**). Les compositions synthétiques explicites couvrent 60% de la surface et près de 2/3 du stock sur pied, pour des ensembles dépassant la plupart du temps les 50,000 ha. Ces éléments démontrent à la fois l'efficacité et l'intelligibilité de cette partition, qui sont une garantie d'utilité.

Cette partition peut avoir plusieurs valorisations : i) servir de référentiel national ou régional pour des forêts métropolitaines, et d'appui pour la formulation de politiques forestières (exemple actuel du plan national forêt-bois), ii) servir de fondement écologiquement plus étayé pour des approches de simulation quantitative de l'évolution des ressources forestières (Wernsdörfer *et al.*, 2012 ; Colin *et al.*, 2017) dans lesquelles le rôle des espèces ligneuses est majeur, iii) servir de base à une exploration contextuelle des causes dynamiques de l'expansion des forêts françaises (Denardou *et al.*, 2017).

La partition peut être généralisée à d'autres facteurs, en suivant des principes de décision formulés à cette fin.

Références

- AMECOURT (D'), A., HOULLIER, F., LEMAS, P.-R. & SÈVE, J.-C. (2016). – *Plan recherche & innovation 2025 filière forêt-bois*. Ministère de l'Agriculture, Paris.
- BADRÉ, M. (1992). – Les forêts et les industries en Lorraine à la fin du XVIIIe siècle. *Revue Forestière Française*, 44: 365-369.
- BARBATI, A., MARCHETTI, M., CHIRICI, G. & CORONA, P. (2014). – European Forest Types and Forest Europe SFM indicators: Tools for monitoring progress on forest biodiversity conservation. *Forest Ecology and Management*, 321: 145-157.
- BAZIRE, P. (1984). – L'inventaire forestier national français. *Revue Forestière Française*, 36 : 14-24.
- BAZIRE, P. & GADANT, J. (1991). – *La forêt en France*. La documentation française, Paris.
- BOPPE, L. (1889). – *Traité de sylviculture*. Berger-Levrault, Nancy.
- BOUTEFEU, B. (2005). L'aménagement forestier en France : à la recherche d'une gestion durable à travers l'histoire. — *Vertigo* 6, 1-8.
- BRÊTHES, A. (1989). – La typologie des stations forestières. Recommandations méthodologiques. *Revue Forestière Française*, 41: 7-27.
- BRUCCIAMACHIE, M. (2001). – Les typologies de peuplement, 20 ans après. *Revue Forestière Française*, 53: 449-458.
- CAVAIGNAC, S. (2009). – *Les sylvoécotopes (SER) de France métropolitaine. Etude de définition*. Inventaire Forestier National, Nogent-sur-Vernisson.
- COLIN, A., WERNSDÖRFER, H., THIVOLLE-CAZAT, A. & BONTEMPS, J.-D. (2017). – *France. Country report*. Pp 159-174 in: S. Barreiro, M.-J. Schelhaas, R. McRoberts, & G. Kändler (eds), *Forest inventory-based projection systems for wood and biomass availability*, Springer, Berlin, Heidelberg, New-York.
- COPPINI, M. & HERMANIN, L. (2007). – Restoration of selective beech coppices: a case study in the Apennines (Italy). *Forest Ecology and Management*, 249: 18-27.
- DAUBRÉE, L. (1912). – *Statistique et atlas des forêts de France*. Ministère de l'Agriculture et de la Forêt, Paris.
- DAVASSE, B. (1992). – Anthracologie et espaces forestiers charbonnés. Quelques exemples dans la moitié orientale des Pyrénées. *Bulletin de la société botanique de France*, 139: 597-608.
- DENARDOU, A., HERVÉ, J.-C., DUPOUEY, J.-L., BIR, J., AUDINOT, T. & BONTEMPS, J.-D. (2017). – L'expansion séculaire des forêts françaises est dominée par l'accroissement du stock sur pied et ne sature pas dans le temps. *Revue Forestière Française*, 69: 319-339.
- DUNFORD, R., SU, Q., TAMANG, E. & WINTOUR, A. (2014). – The Pareto Principle. *The Plymouth Student Scientist* 7, 140-148.

- EUROPEAN COMMISSION. (2015). – *Sustainable agriculture, forestry and fisheries in the bioeconomy - A challenge for Europe*. 4th SCAR Foresight Exercise
- FOREST EUROPE. (2015). – *State of Europe's forests 2015*. FAO, EFI, Madrid.
- GALBERT (DE), M., MAGRUM, M. & MORIN, G.-A. (2015). – *Valorisation agricole et forestière de l'espace rural*. Ministère de l'Agriculture, Paris.
- GUITTON, J.-L. & RIOU-NIVERT, P. (1987). – Reboisement et sylviculture des résineux. *Revue Forestière Française*, 39: 56-67.
- HERVÉ, J.-C., WURPILLOT, S., VIDAL, C. & ROMAN-AMAT, B. (2014). – L'inventaire des ressources forestières en France: un nouveau regard sur de nouvelles forêts. *Revue Forestière Française*, 66: 247-260.
- HÜFFEL, G. (1926). – *Les méthodes de l'aménagement forestier en France*. Berger-Levrault, Nancy-Paris-Strasbourg.
- IFN. (2004). – Des changements majeurs à l'IFN pour mieux répondre aux besoins des utilisateurs. *IF*, n°5, 8pp.
- IFN. (2008). – Nouvelle cartographie forestière. De la production à l'utilisation. *IF*, n°20, 8pp.
- IFN. (2011). – Une nouvelle partition écologique et forestière du territoire métropolitain. *IF*, n°26, 8pp.
- IGN. (2016). – Les forêts mélangées. *IF*, n°36, 12 pp.
- JARRET, P. (2004). – *Chênaie atlantique*. Guide des sylvicultures. Lavoisier, Paris.
- LACAZE, J.-F. (1964). – Comparaison de diverses provenances de pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) représentées dans les arboretums forestiers. *Revue Forestière Française* : 658-686.
- LEPART, J., MARTIN, A., MARTY, P., & DEBAIN, S. (2001). La progression des pins sur les Causses : un phénomène difficilement contrôlable ? L'exemple du Causse Méjan. *Forêt méditerranéenne*, 22: 23-28.
- MCGILL, B., ETIENNE, R. S., GRAY, J. S. & al. (2007). – Species abundance distributions moving beyond single prediction theories to integration within an ecological framework. *Ecology Letters*, 10: 995-2015.
- MORNEAU, F., DUPREZ, C. & HERVÉ, J.-C. (2008). – Les forêts mélangées en France métropolitaine. Caractérisation à partir des résultats de l'Inventaire forestier national. *Revue Forestière Française*, 60: 107-120.
- PARDÉ, J. (1966). – Forêts et reboisements à haute productivité en France. *Revue Forestière Française*, 11: 718-724.
- PIGNARD, G. (2000). – Evolution récente des forêts françaises : surface, volume sur pied, productivité. *Revue Forestière Française*, 52: 27-36.
- PLAISANCE, G. (1966). – Une conversion réussie. Oeuvre de Bernard Lorentz. *Revue Forestière Française*: 82-98.

- QUÉZEL, P. & BONIN, G. (1980). – Les forêts feuillues du pourtour méditerranéen. Constitution, écologie, situation actuelle, perspectives. *Revue Forestière Française* 32: 253-268.
- SAILLET, B. (1991). – De l'utilité des boisements pour la restauration et la conservation des terrains de montagne. *Revue Forestière Française*, 43: 119-130.
- SARDIN, T. (2008). – *Chênaies continentales*. Guide des sylvicultures. Lavoisier, Paris.
- SEYNAVE, I., GÉGOUT, J.-C., HERVÉ, J.-C. & DHÔTE J.-F. (2008). – Is the spatial distribution of European beech (*Fagus sylvatica* L.) limited by its potential height growth? *Journal of Biogeography*, 35: 1851-1862.
- TOMPPO, E., GSCHWANTNER, T., LAWRENCE, M. & MCROBERTS, R. E. (2010). *National forest inventories - pathways for common reporting*. Springer, Heidelberg, Dordrecht, London, New-York.
- TOUZET, T. & LECORDIX F. (2010). – La carte forestière sans papier. *Journal du comité français de cartographie*, 206: 53-62.
- WERNSDÖRFER, H., COLIN, A., BONTEMPS, J.-D., CHEVALIER, H., PIGNARD, G., CAURLA, S., LEBAN, J.-M., HERVÉ, J.-C. & FOURNIER M. (2012). – Large-scale dynamics of a heterogeneous forest resource are driven jointly by geographically varying growth conditions, tree species composition and stand structure. *Annals of Forest Science*, 69: 829-844.

Annexes de la partie IV

Terme	Acronyme	Définition	Source
Grandes régions écologiques	GRECO	Partition du territoire métropolitain en 11 régions biophysiques	Cavaignac, 2009 IFN, 2011
Sylvoécorégions	SER	Système emboîté de partition des GRECO en 91 unités	IFN, 2011
Types de peuplements	-	Partition de référence des compositions ligneuses mesurées sur les points d'inventaire forestier en 117 types fondamentaux	Morneau <i>et al.</i> , 2008 IGN, 2016 (Tableau 2, online material 1)
Compositions synthétiques explicites	CSE	Type de peuplement ou regroupement de types de peuplements dont la composition en espèces ligneuses est explicite, 29 unités	Cette contribution (Tableau 6)
Compositions synthétiques génériques	CSG	Regroupement de types de peuplement selon les 3 unités « divers feuillus », « divers résineux » et divers mixtes	Cette contribution (Tableau 6)
Compositions synthétiques agrégées	CSA	Regroupement des CSE en 15 unités	Cette contribution (Tableau 7)

Tableau 1. Termes et définitions associés aux typologies utilisées ou mises en œuvre dans l'analyse.

Annexe IV.1

Richesse spécifique nombre d'espèces	Surface forestière (ha)	Effectif	Description	Exemple
1	6 921 000	22	Explicite	Peuplement pur de sapin pectiné
	386 000	4	Générique	Peuplement pur de conifère exotique
2	2 559 000	26	Explicite	Mélange de hêtre et sapin pectiné
	2 035 000	13	Générique	Mélange de pin sylvestre et d'un feuillu
2+	505 000	11	Générique	Mélange de chêne vert et autre(s) feuillu(s)
3	65 000	1	Explicite	Mélange de hêtre, sapin pectiné, et épicéa commun
	452 000	4	Générique	Mélange de hêtre, sapin pectiné, et autre essence
3+	1 307 000	27	Générique	Mélange de frêne, chêne sessile et autre(s) feuillu(s)
4	38 000	2	Générique	Autre mélange de 4 résineux
4+	59 000	4	Générique	Mélange de châtaignier, chênes, et autre(s) feuillus(s)
5	9 000	1	Explicite	Autre mélange de 5 feuillus
	63 000	1	Générique	Autre mélange feuillus/résineux à 5 essences ou +
Indéterminé	1 267 000	1	-	-
Total	15 668 000	117		

Tableau 2. Compositions ligneuses de référence de l'inventaire forestier national (« types de peuplements », Tableau 1). La richesse spécifique est donnée en nombre d'espèces d'arbres forestiers (diversité alpha). La surface forestière est arrondie au millier d'hectares.

Annexes de la partie IV

Type de peuplement (IFN)	Composition synthétique	Rang	Surface (ha)	Surface (%)
Chêne vert pur	Conservé (F71)	1	256,000	19.5
Chêne pubescent pur	Conservé (F3)	2	189,000	14.4
Non déterminé	Ecarté ¹	3	174,000	
Pin d'Alep pur	Conservé (R7)	4	148,000	11.3
Chênes vert et pubescent	Conservé (F9)	5	97,000	7.4
Chêne et pin d'Alep	Chênes – pins (M3)	6	97,000	7.4
Feuillu indigène pur	Divers feuillus (F0) ²	7	55,000	
Chêne et pin sylvestre	Chênes – pins (M3)	8	37,000	2.8
Mélange feuillu/résineux à 2 essences ²	Divers mixtes (M0) ²	9	26,000	
Mélange feuillu/résineux à 3 essences ²	Divers mixtes (M0) ²	10	20,000	
Pin sylvestre pur	Divers résineux (R0) ³	11	20,000	
Chêne et pin maritime	Chênes – pins (M3)	12	19,000	1.5
Total Chênes – pins ⁴			153,000	11,7 ⁴
Total explicité ⁵			843,000	64.3

Tableau 3. Exemple de partition de la surface forestière d'une GRECO en compositions synthétiques explicites (CSE) et génériques (CSG) – illustration des compositions élémentaires ou regroupées en GRECO « Méditerranée ».

¹Peuplements non décrits, ²Types de peuplements génériques non explicites, regroupés dans les compositions génériques F0, R0 ou M0 (voir Tableau 5), ³Type de peuplement de surface insuffisante pour constituer une composition synthétique de la GRECO, ⁴Type de peuplement regroupé, occupant le 3^e rang de la GRECO à l'issue de la procédure, ⁵La proportion minimale de 50% de la surface est atteinte. Les codes des compositions synthétiques sont donnés au Tableau 5.

Annexe IV.1

Type de peuplement (IFN)	Composition synthétique	Rang	Surface (ha)	Surface (%)
Chêne sessile pur	Conservé (F4)	1	427,000	14.8
Chêne pédonculé pur	Regroupé (F11)	2	252,000	8.7
Chênes pédonculé et sessile	F11	5	95,000	3.3
Charme et chêne pédonculé	Regroupé (F5)	6	89,000	3.1
Charme et chêne sessile	F5	8	79,000	2.7
Frêne, chêne pédonculé et autre(s) feuillu(s)	Regroupé (F2)	12	59,000	2.1
Hêtre pur	Conservé (F61)	14	55,000	1.9
Frêne pur	F2	15	54,000	1.9
Chêne pédonculé et autre feuillu	F11	16	49,000	1.7
Chêne pédonculé et bouleau	F11	17	48,000	1.7
Frêne et érable	F2	19	45,000	1.6
Hêtre et chêne sessile	Regroupé (F62)	20	43,000	1.5
Frêne et autre feuillu	F2	22	40,000	1.4
Frêne et chêne pédonculé	F2	24	38,000	1.3
Charme et chênes	F5	26	35,000	1.2
Charme, chêne pédonculé et autres feuillus	F5	28	34,000	1.2
Chêne pédonculé et feuillus secondaires	F11	30	33,000	1.2
Charme	F5	33	25,000	0.9
Frêne et plusieurs feuillus	F2	34	25,000	0.9
Frêne et hêtre	F2	39	20,000	0.7
Hêtre, chêne pédonculé et autres feuillus	F62	40	19,000	0.7
Chêne pédonculé et châtaignier	F11	41	18,000	0.6
Chênes pédonculé et pubescent	F11	42	18,000	0.6

Annexes de la partie IV

Frêne et feuillus secondaires	F2	43	18,000	0.6
Hêtre et chêne pédonculé	F62	45	16,000	0.6
Charme, chêne sessile et autres feuillus	F5	47	15,000	0.5
Hêtre, chêne sessile et autres feuillus	F62	49	15,000	0.5
Frêne, chêne sessile et autres feuillus	F2	50	14,000	0.5
Chêne pédonculé, châtaignier et autres feuillus	F11	51	13,000	0.4
Chêne pédonculé et plusieurs feuillus	F11	56	10,000	0.3
Frêne et chêne sessile	F2	61	6,000	0.2
Hêtre et chênes	F62	62	6,000	0.2
Charme, chênes et autres feuillus	F5	64	5,000	0.2
Frêne et chênes	F2	65	5,000	0.2
Hêtre, chênes et autres feuillus	F62	79	3,000	0.1
Charme et chêne pubescent	F5	82	2,000	<0.1
Frêne, chêne pubescent et autres feuillus	F2	91	900	<0.1
Frêne et chêne pubescent	F2	94	600	<0.1
Charme, chêne pubescent et autres feuillus	F5	96	400	<0.1
Total explicité			1,918,000	66,4

Tableau 4. Exemple de partition de la surface forestière d'une GRECO en compositions synthétiques explicites (CSE) – notion de regroupement autour d'essences « attracteur » en GRECO « CNSO » (voir Figure 1). Gras : essences ou groupes d'essences « attracteurs », Couleur : Chêne pédonculé pur ou avec feuillus, Frêne pur ou avec feuillus, Charme pur ou avec chênes (et autres feuillus), Hêtre et chênes (et autres feuillus). Les codes des compositions synthétiques sont donnés au Tableau 5.

Annexe IV.1

GRECO	Surface (x 10 ³ ha)	Stock (x10 ⁶ m ³)	Compositions synthétiques (spécifiques/génériques)	Surface (ha, %)	Stock (m ³ , %)	Surface non- déterminée (ha, %)	Stock non- déterminé (x10 ⁶ m ³ , %)
Plaines							
Grand Ouest Cristallin et Océanique (GOCO)	645	108.0	4/3	334,000 51.9	57.4 53.2	37,000 5.7	0.4 0.3
Centre Nord semi-océanique (CNSO)	2,889	521.0	7/3	1,918,000 66.4	373.1 71.6	154,000 5.3	1.0 0.2
Grand Est semi-continental (GESC)	2,154	386.6	7/3	1,367,000 63.5	260.7 67.5	125,000 5.8	0.9 0.2
Sud-ouest océanique (SOO)	2,468	276.6	4/3	1,517,000 61.4	199.5 72.1	404,000 16.4	1.9 0.7
Méditerranée (M)	1,312	72.9	5/3	843,000 64.3	48.0 66.2	174,000 13.2	0.5 0.7
TOTAL Plaines							
Montagnes							
Vosges (V)	577	158.3	6/3	321,000 55.5	101.2 64.0	29,000 5.0	2.7 0.2
Jura (J)	496	118.3	6/2*	322,000 64.9	91.5 78.1	19,000 3.9	0.2 0.1

<i>Annexes de la partie IV</i>							
Massif Central (MC)	2,788	533.7	11/3	1,636,000	350.7	170,000	1.2
				58.7	65.7	6.1	0.2
Alpes (A)	1,234	207.9	8/3	771,000	135.5	70,000	0.6
				62.3	65.2	5.7	2.7
Pyrénées (P)	711	117.0	8/3	369,000	70.2	28,000	0.1
				51.9	60.0	3.9	0.1
Corse (C)	394	43.1	4/2*	226,000	29.7	55,000	0.2
				57.5	69.0	14.0	0.4
TOTAL Montagnes							
TOTAL	15,668,000	2,543.4	29/3	9,624,000	1717.5	1,265,000	8.1
				61.4	65.9	8.1	0.003

Tableau 5. Statistiques des surfaces forestières et stocks de bois sur pied totaux des différentes régions écologiques (GRECO) et part associée aux compositions synthétiques explicites (CSE) identifiées dans chaque GRECO. *Corse et Jura : absence de la CSG « divers résineux ».

Annexe IV.1

Code	Compositions synthétiques	Fréquence	GRECO	Surface (x10 ³ ha, %)	Stock (x10 ⁶ m ³ , %)
Compositions feuillues					
F1.1	Chêne pédonculé pur / avec feuillus ¹	5	GOCO, CNSO, GESC, SOO, P	1,296 (8.3)	215.2 (8.3)
F1.2	Chêne pédonculé avec feuillus	1	MC	319 (2.0)	60.9 (2.3)
F1.3	Chêne pédonculé	1	MC	121 (0.8)	23.5 (0.9)
F2	Frêne pur / avec feuillus	4	CNSO, GESC, J, P	808 (5.2)	145.8 (5.6)
F3	Chêne pubescent	5	SOO, MC, P, M, A	802 (5.1)	64.5 (2.5)
F4	Chêne sessile	4	GOCO, CNSO, GESC, MC	715 (4.6)	153.5 (5.9)
F5	Charme pur / avec chênes (+feuillus)	2	CNSO, GESC	631 (4.0)	114.9 (4.4)
F6.1	Hêtre	7	A, P, J, V, MC, CNSO, GESC	594 (3.8)	130.5 (5.0)
F6.2	Hêtre et chênes (+feuillus)	3	CNSO, GESC, V	441 (2.8)	94.6 (3.6)
F6.3	Hêtre pur / avec chênes (+feuillus)	1	GOCO	56 (0.4)	12 (0.5)
F7.1	Chêne vert	2	M, C	336 (2.1)	16.5 (0.6)
F7.2	Chêne vert et feuillus	1	C	99 (0.6)	8.4 (0.3)
F8.1	Châtaignier pur / avec feuillus ²	1	SOO	206 (1.3)	1.3 (1.3)
F8.2	Châtaignier	1	MC	130 (0.8)	20.3 (0.8)
F9	Chênes vert / pubescent	1	M	97 (0.6)	5.0 (0.2)
Compositions résineuses					
R1	Pin maritime	2	SOO, C	613 (3.9)	81.4 (3.1)
R2	Pin sylvestre	2	MC, A	355 (2.3)	47.4 (1.8)
R3	Epicéa commun	4	V, J, MC, A	264 (1.7)	93.8 (3.6)
R4	Sapin pectiné	4	V, J, MC, P	243 (1.6)	92.5 (3.5)
R5	Pins ³	2	GOCO, CNSO	241 (1.5)	47.4 (1.8)
R6	Douglas	1	MC	169 (1.1)	55.5 (2.1)
R7	Pin d'Alep	1	M	148 (0.9)	11.4 (0.4)
R8	Mélèze	1	A	66 (0.4)	13.2 (0.5)
R9	Epicéa commun / sapin pectiné	2	V, J	64 (0.4)	22.1 (0.8)

R10	Pin noir	1	A	50 (0.3)	7.4 (0.3)
R11	Pin laricio	1	C	23 (0.1)	7.2 (0.3)
Compositions mixtes					
M1	Pin sylvestre et feuillus	2	MC, A	297 (1.9)	40.3 (1.5)
M2	Hêtre et sapin pectiné ou ⁴ épicéa commun (+ autres essences)	3	V, J, A	287 (1.8)	88.1 (3.4)
M3	Chênes et pins	1	M	153 (1.0)	11.2 (0.4)
Compositions génériques					
F0	Divers feuillus	11	Toutes	2,675 (17.1)	376.1 (14.4)
M0	Divers mixtes	11	Toutes	1,204 (7.7)	230.8 (8.8)
R0	Divers résineux	9	Sauf J, C	863 (5.5)	274.1 (10.5)

Tableau 6. Identification, localisation et importance des compositions synthétiques explicites (CSE) et génériques (CSG) retenues. ¹Feuillus : autres que châtaignier (SOO), autres que hêtre (GOCO), autres que hêtre, charme et frêne (CNSO, GESG), ²Feuillus essentiellement composés de chênes, ³Pins : pin maritime, pin sylvestre et pin laricio (et pin noir en CNSO), ⁴ « Ou » inclusif, le sapin et l'épicéa pouvant accompagner simultanément le hêtre.

Annexe IV.1

Essences dominantes	Compositions synthétiques	Surface	Stock sur pied
		(x10 ³ ha, %)	(x10 ⁶ m ³ , %)
Divers Feuillus	F0	2,675 (17.1)	376 (14.4)
Chêne pédonculé et cortège feuillu	F1.1 – F1.3	1,736 (11.1)	300 (11.5)
Pins	R1, R2, R5, R7, R10, R11	1,727 (11.0)	242 (9.3)
Chênes méridionaux et cortèges feuillus	F3, F7.1, F7.2, F9	1,334 (8.5)	94 (3.6)
Divers mixtes	M0	1,204 (7.7)	231 (8.8)
Divers Résineux	R0	863 (5.5)	274 (10.5)
Frêne et cortège feuillu	F2	808 (5.2)	146 (5.6)
Chêne sessile	F4	715 (4.6)	153 (5.9)
Charme, chênes et cortège feuillu	F5	631 (4.0)	115 (4.4)
Hêtre	F6.1	594 (3.8)	130 (5.0)
Epicéa, sapin et mélange	R3, R4, R9	571 (3.7)	208 (8.0)
Hêtre, chênes et cortèges feuillus	F6.2 – F6.3	497 (3.2)	107 (4.1)
Châtaignier et cortèges feuillus	F8.1 – F8.2	336 (2.1)	53 (2.0)
Pin sylvestre et cortèges feuillus	M1	297 (1.9)	40.3 (1.5)
Hêtre, sapin/épicéa et cortèges divers	M2	287 (1.8)	88 (3.4)
Douglas	R6	169 (1.1)	55 (2.1)
Chênes et pins	M3	153 (1.0)	11 (0.4)
Mélèze	R8	66 (0.4)	13 (0.5)

Tableau 7. Agrégation des compositions synthétiques agrégées (CSA) par essences dominantes, classées par ordre d'importance dans la surface de la forêt de production française. Les chiffres de stock sur pied sont également renseignés, et permettent de mesurer la capitalisation de ces regroupements (par exemple importante pour les résineux du groupe R8 – R10, et faible pour les chênes méridionaux, F6 – F9).

Figure 1. Partition géographique du territoire métropolitain en grandes régions écologiques (GRECO). Les GRECO sont issues d'une analyse du milieu biophysique (Cavaignac, 2009) et séparent des contextes de montagne et de plaine, ainsi que des influences océaniques et continentales. Les identifiants de ces régions et leurs acronymes sont indiqués sur la carte.

Figure 2. Taux de couverture de la surface forestière d'unités géographiques en fonction du rang des types de peuplements de l'inventaire forestier selon leur étendue spatiale. Ces fonctions de répartition sont illustrées pour trois grandes régions écologiques (GRECO, haut) et trois sylvoécorégions (SER, bas ; voir Tableau 1).

Figure 3. Taux de couverture du stock de bois sur pied de l'ensemble des CSE de chaque grande région écologique (GRECO) en fonction de leur taux de couverture en surface forestière. Pour l'ensemble des GRECO, les CSE assurent une couverture en stock de bois supérieure à celle des surfaces. Voir Figure 1 pour la définition des GRECO.

Figure 4. Importance en stock de bois sur pied (hm^3) des compositions synthétiques agrégées (CSA) en fonction de leur importance surfacique. La pente de la droite figurée correspond au stock sur pied moyen par hectare des CSA. Ces compositions sont décrites au tableau 6 : +F = cortèges feuillus, +D = et cortèges divers, CP = Chêne pédonculé, CS = Chêne sessile, C = chênes, CMéd = chênes Méditerranéens.

Figure 5. Compositions synthétiques agrégées (CSA) ordonnées selon leur densité moyenne de stock de bois sur pied (m^3/ha). Voir tableau 6 et Figure 4 pour les dénominations



Figure 1.

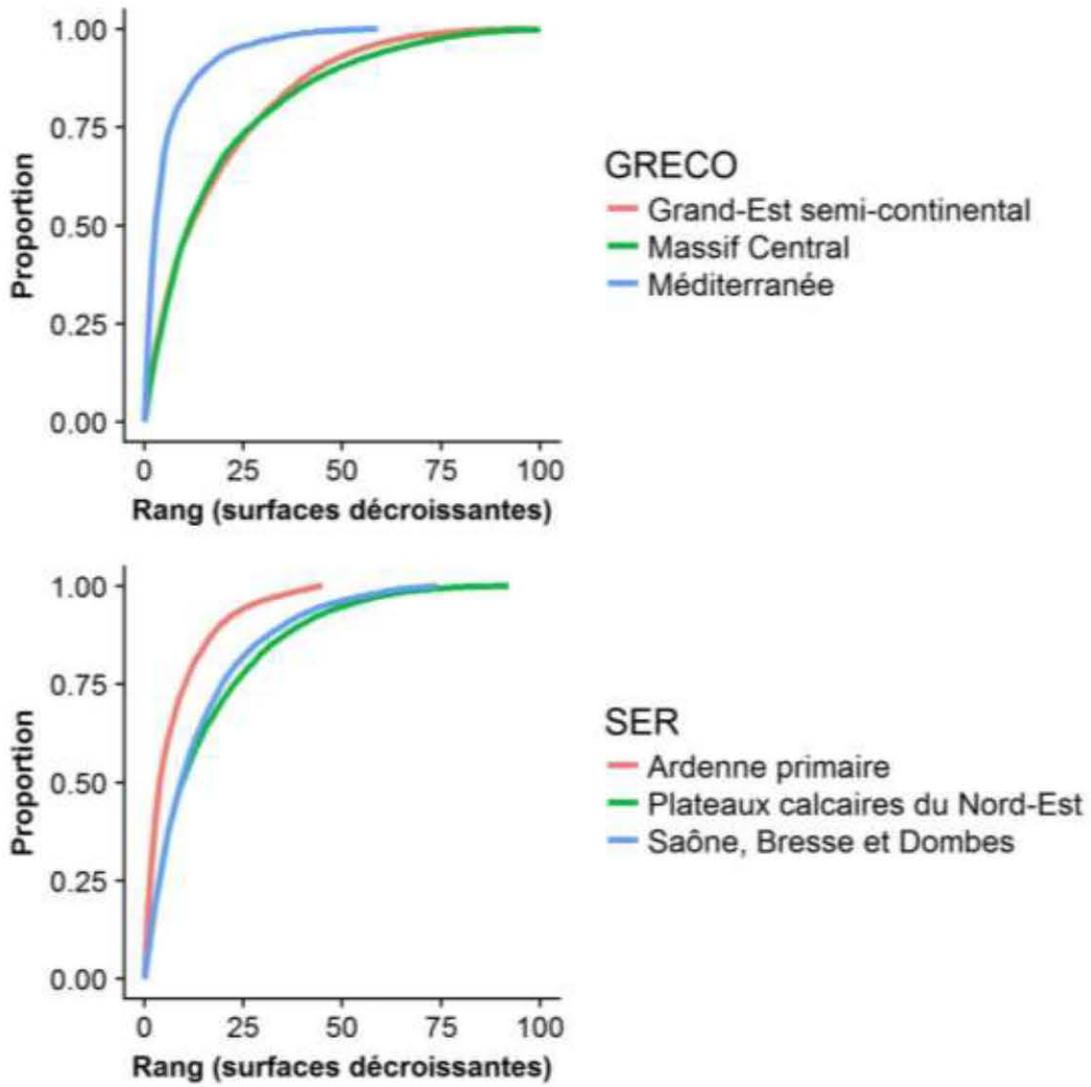


Figure 2.

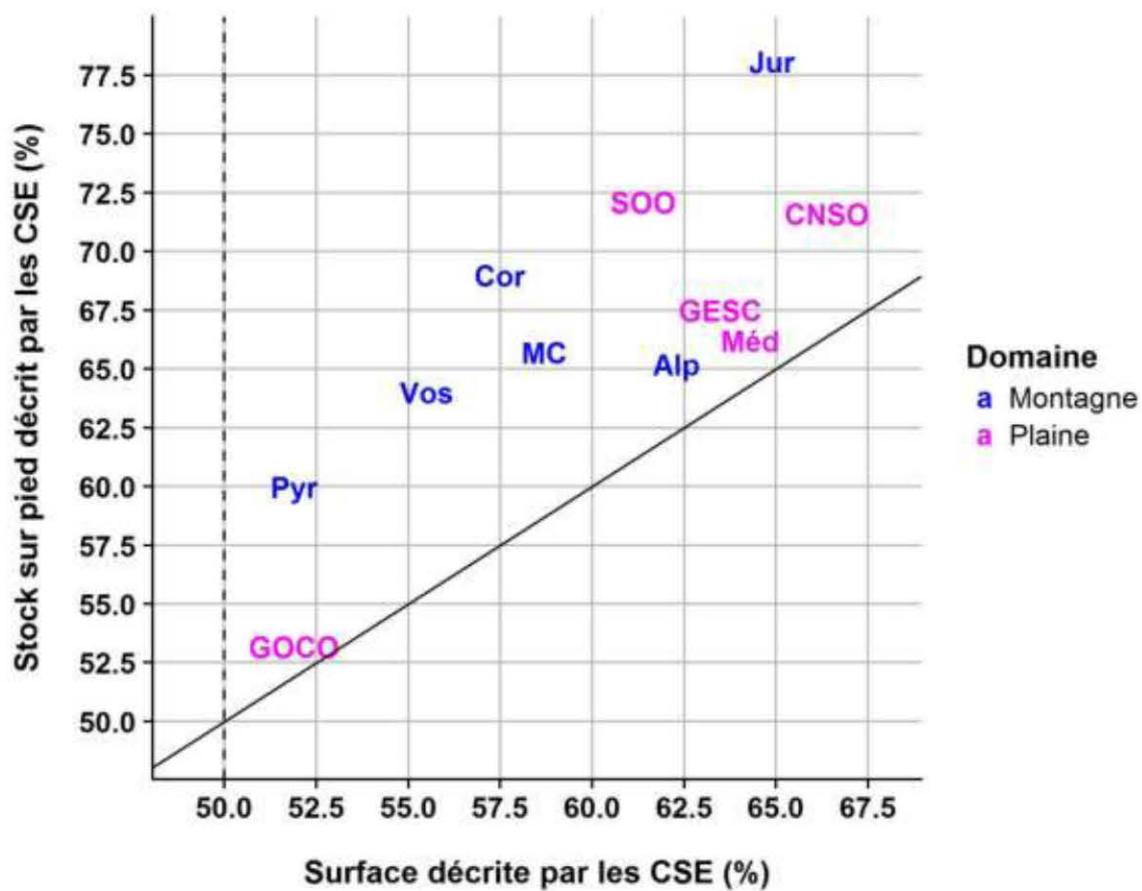


Figure 3.

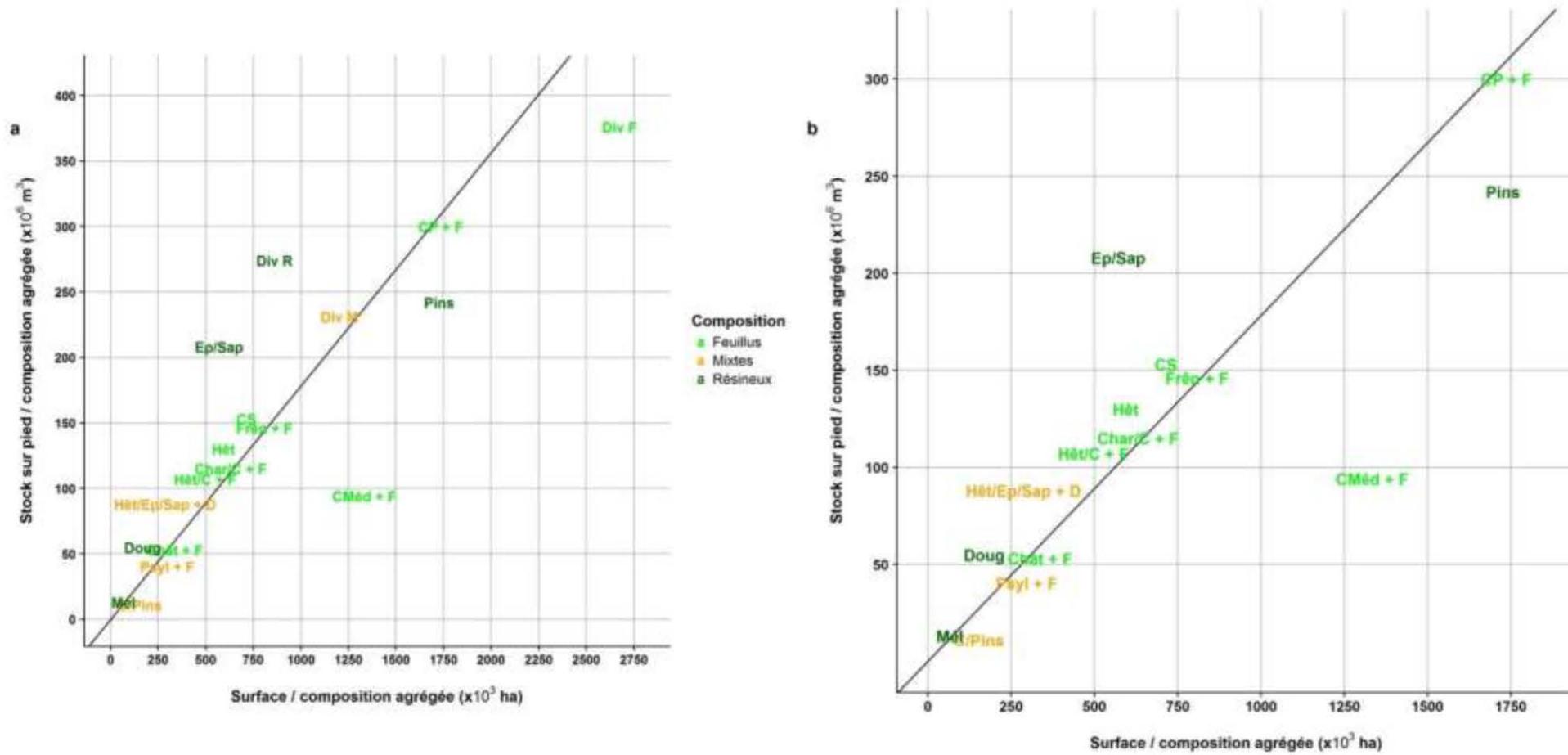


Figure 4.

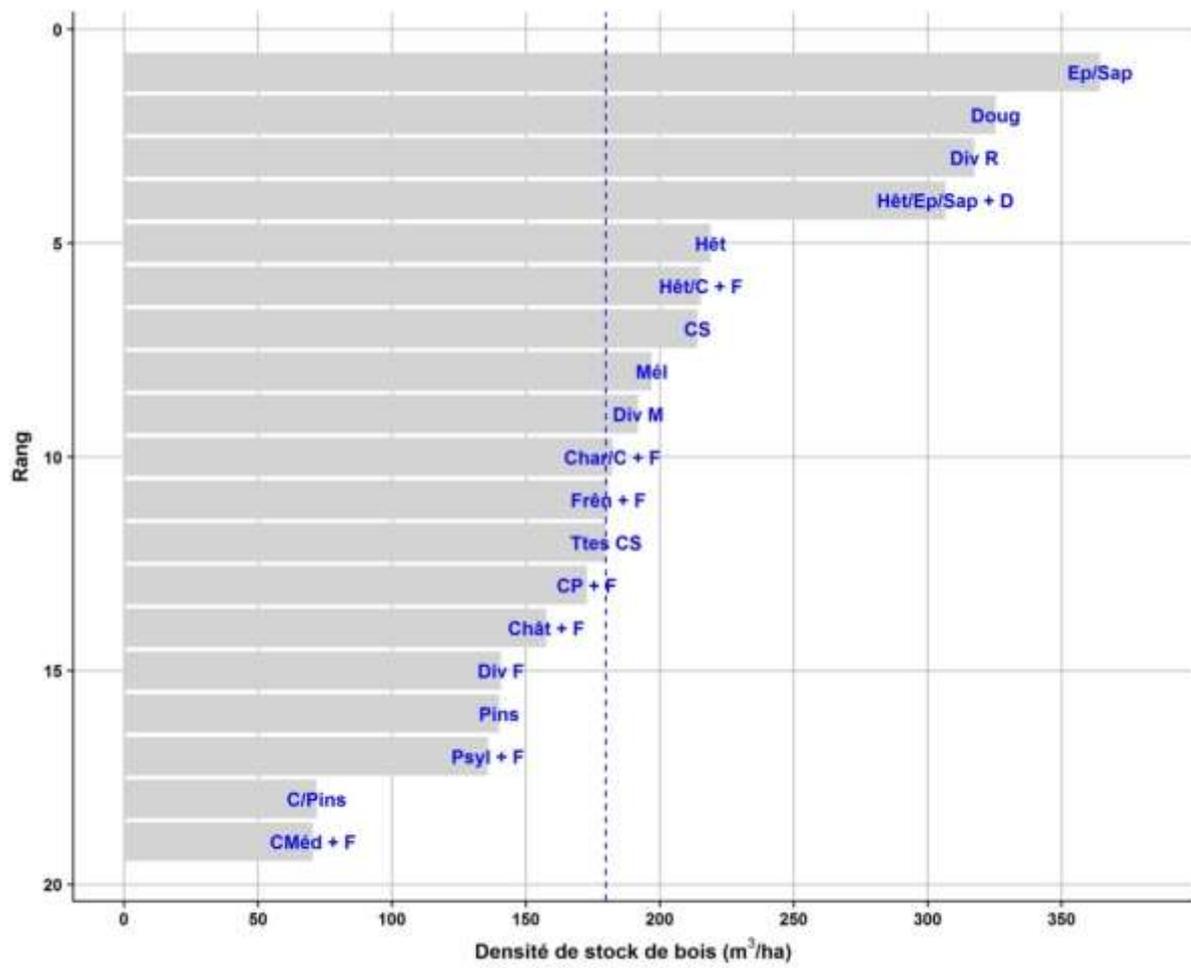


Figure 5.

Annexe IV.2. Essai d'homogénéisation des informations de composition en essence au niveau des points d'inventaire entre l'ancienne (1976-2004) et la nouvelle méthode (2007-2012)

A.IV.2.1 Utilisation de la variable IMPESS

La donnée IMPESS est découpée en quatre classes :

- Code 1 : essence pure : essence dont le TCLR est supérieur à 75%
- Code 2 : essence prépondérante : essence occupant le plus grand couvert (dans le doute, celle de plus gros volume ou, si le doute persiste, celle de plus grande valeur économique).
- Code 3 : essence importante : essence occupant un couvert libre relatif au moins égal à 25 % du couvert total du peuplement.
- Code 4 : essence mineure : essence présente mais dont le couvert libre relatif n'atteint pas ou n'excède pas 25% du couvert total du peuplement.

Il est à remarquer que dans le cas où une essence est pure (code IMPESS 1), aucune autre essence ne peut présenter un code IMPESS de 1, 2 ou 3. De même, si on est en présence d'un mélange, aucune essence ne peut avoir un code IMPESS 1 et le code 2 sera attribué à l'essence la plus importante du mélange. Tous les points ont donc soit une essence associée à un code IMPESS de 1 (pur) ou de 2 (mélange).

La variable IMPESS est décrite par sous-unité de peuplement (4 modalités : Unique, taillis d'un mélange futaie-taillis, futaie d'un mélange futaie-taillis, supplémentaire ; **Tableau A.IV.2.1**). Il a été choisi de ne travailler qu'avec les peuplements en structure régulière et les futaies des mélanges futaie-taillis, peuplements représentant la strate recensable de l'IFN.

Libellé	Définition
Unique	Ensemble du peuplement principal en structure forestière régulière (hormis étage d'importance mineure et de hauteur ou d'âge très nettement distincts)
Taillis de mélange futaie-taillis	Taillis d'un mélange futaie-taillis
Futaie de mélange futaie-taillis	Futaie d'un mélange futaie-taillis
Supplémentaire	Peuplement annexe en structure régulière pouvant être une strate d'essence prépondérante < 50% du couvert ou de vieux reliquats sur une jeune régénération ou une jeune régénération sous un peuplement mur non exploité

Tableau A.IV.2.1 Libellés et définitions des modalités de sous-unités identifiées par l'IFN

Les compositions identifiées par l'IFN en NM sont décrites à partir des essences ayant un TCLR supérieur à 15%. Or, la variable IMPESS n'a pas de séparation à ce niveau mais en a une à 25%. Nous avons donc choisi d'identifier les compositions à partir des essences dont le code IMPESS est 1, 2 ou 3. Ainsi, la limite basse est remontée à 25%.

A.IV.2.2 Cas des chênes non différenciés

A la fin de l'AM (à partir des années 2000), la modalité « chêne indifférencié » (codée 01) a parfois été utilisée pour décrire l'essence d'un arbre ou d'un groupe d'arbre. Derrière cette modalité (utilisée pour décrire 2705 points d'inventaire) peut se cacher soit du chêne sessile, soit du chêne pédonculé, soit du chêne pubescent. Il est donc indispensable d'identifier l'essence présente afin de reconstituer les compositions.

Afin d'identifier l'essence de ces chênes, nous avons travaillé à deux échelles : l'échelle de l'essence (à laquelle est associée la variable IMPESS) et l'échelle de l'arbre.

La variable IMPESS est associée à l'essence dans le point. Pour pouvoir différencier dans les compositions chêne sessile, chêne pédonculé et chêne pubescent, il faut qu'un point qui présente le chêne indifférencié comme essence ayant une IMPESS de 1, 2 ou 3 n'ait qu'une seule sorte de chêne quand on regarde ses arbres individuellement et que l'essence soit bien différenciée (*i.e.* différente de 01).

Le nombre de points qui présentent le chêne indifférencié en essence pure, prépondérante et importante a été calculé. Les résultats ont été ventilés selon le fait qu'il est possible d'identifier l'essence de chêne présente (*i.e.* il n'y a qu'un seul type de chêne présent dans les arbres recensables et ce chêne est identifié) ou non (*i.e.* il y a plusieurs chênes présents dans les arbres recensables ou il y a du chêne indifférencié dans les arbres recensables).

Il a été vérifié qu'aucun point ne présente à la fois le chêne indifférencié et un chêne identifié en IMPESS 1, 2 ou 3.

Seuls 26 départements présentent des chênes indifférenciés. Parmi toutes les GRECO, le CN (11 départements) et le MC (7 départements) sont les plus représentées. Certaines GRECO ne présentent qu'un seul département touché (GO, GE, Vo, Me, Co).

Cinq cas de figures ont été observés :

1. Les points où l'on trouve le chêne indifférencié au niveau de l'essence mais aucun arbre n'a été relevé → « point sans arbre »
2. Les points où l'on trouve le chêne indifférencié au niveau de l'essence mais aucun chêne n'a été relevé → « point sans chêne »
3. Les points où l'on trouve le chêne indifférencié au niveau de l'essence et un seul type de chêne a été relevé (différent du chêne indifférencié) → « point déterminé »
4. Les points où l'on trouve le chêne indifférencié au niveau de l'essence et au niveau des arbres relevés → « point avec du 01 »

5. Les points où l'on trouve le chêne indifférencié au niveau de l'essence et deux types de chênes, au moins, ont été relevés (différents du chêne indifférencié) → « point avec deux chênes »

Les cas 1 et 2 (identifiés dans 158 points ; 6%) sont traités comme des points ne comportant pas de chêne. Le cas 3 (identifié dans 929 points ; 34%) est le seul permettant de différencier l'essence. Les cas 4 et 5 (identifiés dans 1618 points ; 60%) laissent un doute quant à l'essence présente. Ces derniers points ont été assignés de façon proportionnelle aux compositions présentes dans les départements des points.

Grâce à la variable IMPESS et l'identification des chênes indifférenciés, un essai d'attribution de composition aux points AM a été effectué. Les compositions utilisées sont celles définies par la partition (voir partie IV – 2.1).

A.IV.2.3 Vérification de la cohérence des compositions identifiées entre ancienne et nouvelle méthode

Chaque point AM et NM ayant été associé à une composition, il a été possible d'étudier la variation de surface par département de ces compositions en combinant à la fois les données AM et NM. Les compositions NM ont été calculées soit à partir du regroupement des compositions IFN (méthode 1) soit en recalculant ces compositions avec un seuil minimum de 25% pour coller au mieux à la donnée IMPESS (méthode 2). Les évolutions de surfaces ont permis de juger de la cohérence ou non des compositions AM et NM pour chaque méthode, en vérifiant si un biais important est observable.

A.IV.2.3.1 Méthode 1 : seuil minimum NM de 15%

Pour certaines compositions, les chronologies d'évolution des surfaces présentent un coude important entre les surfaces AM et NM, traduisant un biais empêchant l'utilisation de cette méthode (**Figure A.IV.2.1**).

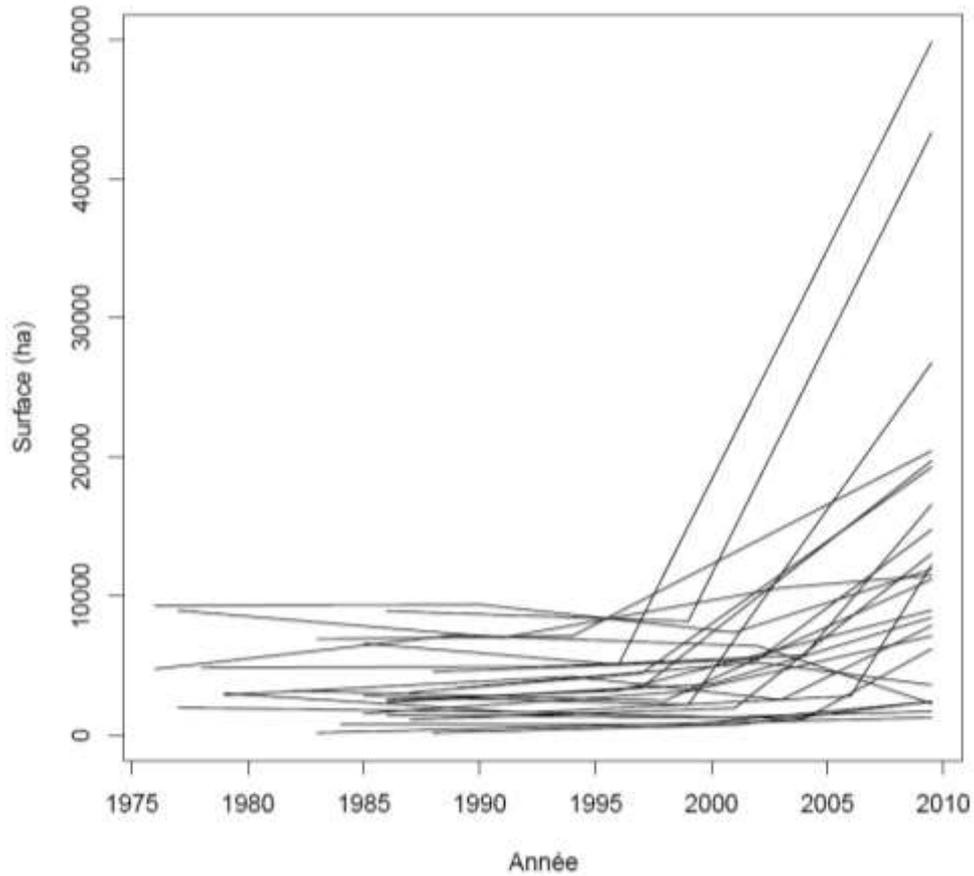


Figure A.IV.2.1 Evolution de la surface des forêts de charme pur ou avec chêne du Centre Nord semi-océanique. Les données AM sont calculées à partir de la variable IMPESS (méthode 1).

A.IV.2.3.2 Méthode 2 : seuil minimum NM de 25%

Le coude persiste avec la méthode 2 (**Figure A.IV.2.2**) montrant qu'il n'y a pas juste une différence de seuil entre AM et NM mais aussi une différence de prise en compte de l'importance du couvert des essences par les opérateurs de terrain.

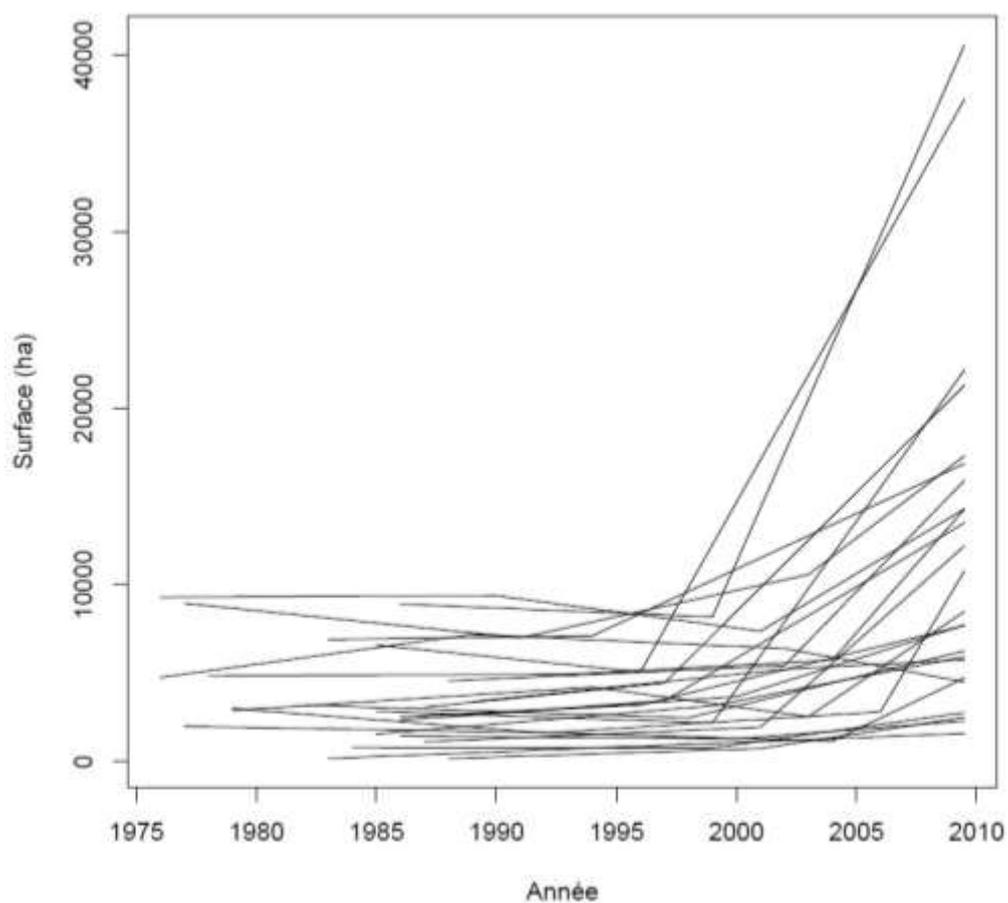


Figure A.IV.2.2 Evolution de la surface des forêts de charme pur ou avec chêne du Centre Nord semi-océanique. Les données AM sont calculées à partir de la variable IMPESS et les données NM sont recalculées avec un seuil minimum de 15% (méthode 2).

Annexe IV.3. Comparaison des flux de prélèvement de bois des deux méthodes d'inventaire à l'échelle de grands domaines statistiques.

A.IV.3.1 Méthode

Le changement de méthode d'inventaire en 2005 a engendré beaucoup de changements dont, entre autres, la mise en place d'un nouveau protocole de relevé des arbres prélevés (voir partie IV-2.2).

Le protocole ancienne méthode (P_AM) se base sur des avis d'experts afin d'identifier les souches de moins de 5 ans alors que le protocole nouvelle méthode (P_NM) procède, grâce à un retour sur les points 5 ans après, à un inventaire exact des arbres prélevés. Il a été décidé de vérifier la véracité de la donnée de prélèvement ancienne méthode en comparant les résultats des deux protocoles.

Pour vérifier cette concordance, nous avons utilisé les données IFN de 2005 et 2006 (12 822 points d'inventaire) qui ont l'avantage d'avoir mis en œuvre les deux protocoles et qui permettent donc leur comparaison.

Le nombre de tiges prélevées par an a été calculé et les résultats ont été agrégés à l'échelle de la GRECO puis à celle de la propriété à l'intérieur de la GRECO.

A.IV.3.2 Résultats

A.IV.3.2.1 Stratification par GRECO

La corrélation entre les résultats donnés par P_AM et P_NM calculés à l'échelle de la GRECO est de 0,97 ($p < 10^{-12}$; **Figure A.IV.3.1**). Les résultats de P_NM sont 2,4 fois plus forts que ceux de P_AM.

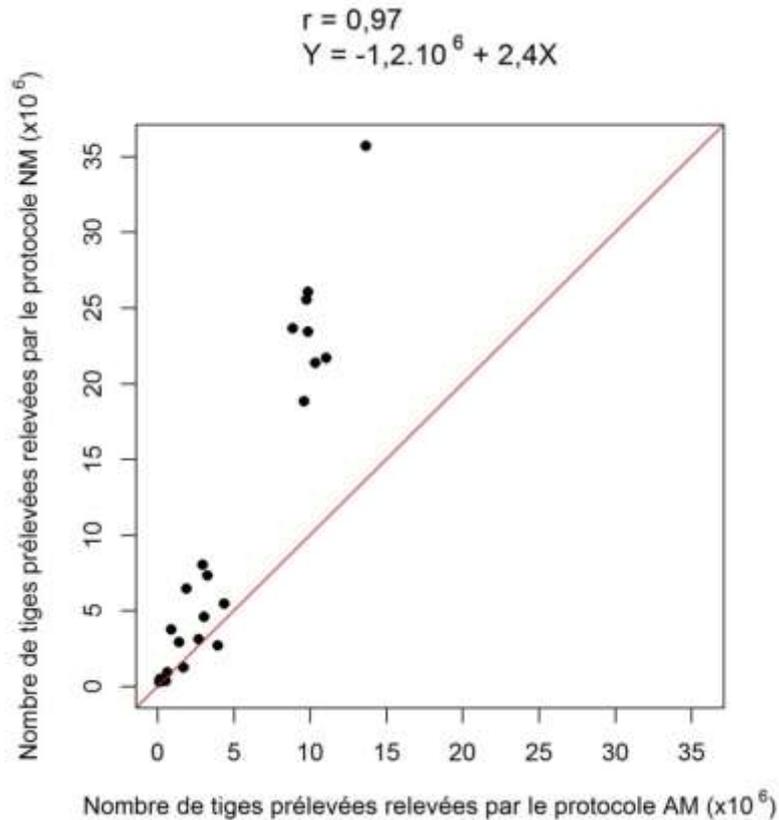


Figure A.IV.3.1 Comparaison du nombre de tiges prélevées relevées par les protocoles ancienne (AM) et nouvelle méthode (NM) pour la stratification par GRECO

A.IV.3.2.2 Stratification par GRECO et propriété

La corrélation entre les résultats donnés par P_AM et P_NM calculés à l'échelle GRECO x propriété est de 0,97 ($p < 10^{-15}$; **Figure A.IV.3.2**). En séparant les types de propriétés, on remarque que la corrélation est plus forte dans les forêts privées (0,97) et plus faible dans les forêts communales (0,89 ; **Tableau A.IV.3.1**). De plus, le biais dépend de la propriété. Alors que les prélèvements relevés par P_NM sont 2,3 fois plus élevés que ceux relevés par P_AM dans les forêts domaniales et privées, ils sont 2,8 fois plus élevés dans les forêts communales.

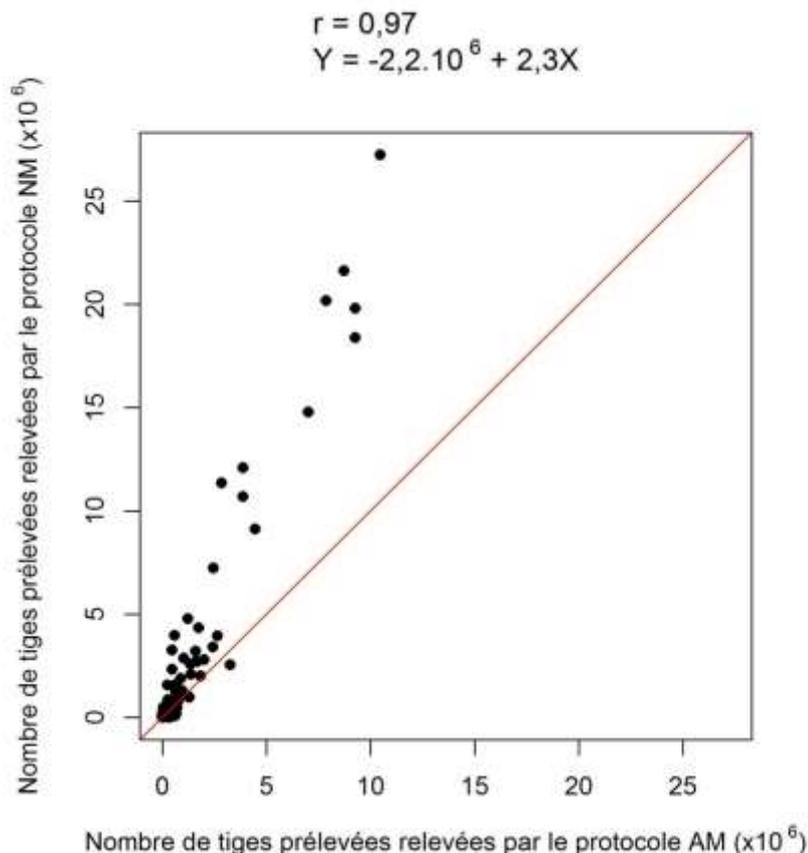


Figure A.IV.3.2 Comparaison du nombre de tiges prélevées relevées par les protocoles ancienne (AM) et nouvelle méthoe (NM) pour la stratification par propriété et GRECO

Propriété	r	Pente
Communal	0,89	2,8
Domanial	0,91	2,3
Privé	0,97	2,3

Tableau A.IV.3.1 Résultats des corrélations entre le nombre de tiges mortes calculé avec l'ancienne méthode et celui calculé avec la nouvelle pour chaque type de propriété

A.IV.3.3 Conclusion

Les résultats montrent une bonne corrélation entre les résultats du protocole AM et ceux du protocole NM. On remarque, en revanche, une forte différence entre les résultats des deux protocoles. Ceux de P_NM sont plus de deux fois plus élevés que ceux de P_AM. Cela suggère que de nombreuses souches de moins de 5 ans, n'ont pas été relevées dans le protocole P_AM car elles ont été considérées comme étant plus anciennes.

Les corrélations se dégradent quand on stratifie par type de propriété. Diminuant jusqu'à 0,89 pour les forêts communales. De plus, la pente de la régression linéaire qui lie les résultats des deux protocoles diffère d'un type de propriété à l'autre.

Ces fortes variations lorsque l'on stratifie par type de propriété et GRECO montre que cette donnée est peu précise et qu'il est impossible d'utiliser la variable de prélèvement qui est trop biaisée. Il est donc indispensable d'estimer ces prélèvements par une autre méthode. Nous utiliserons par la suite un bilan de flux pour calculer les prélèvements (cf. partie IV - 3.2.3).

Annexe IV.4. Estimation dendrométrique permettant le calcul des flux de surface terrière

Deux estimations ont dû être effectuées pour permettre un calcul très précis des flux de surface terrière :

- i) L'estimation de l'épaisseur de l'écorce à partir du diamètre à 1,30 m, indispensable au calcul des flux de croissance et de recrutement.
- ii) L'estimation de la circonférence à 1,30 m à partir de la circonférence à la base, indispensable pour le calcul des flux de mortalités car la circonférence à 1,30 m est rarement relevée sur les arbres morts.

A.IV.4.1 Estimation de l'épaisseur d'écorce à partir du diamètre à 1,30 m

L'épaisseur d'écorce est une donnée renseignée par l'IFN. Cependant, pour le calcul des flux de croissance et de recrutement (cf. Partie IV – 3.2.1) des reconstitutions de l'évolution du diamètre sont effectuées et il est alors indispensable de pouvoir estimer la valeur passée de cette épaisseur.

Pour cela, nous avons travaillé avec les valeurs IFN du diamètre à 1,30 m (D13) et de l'épaisseur d'écorce (EC) afin d'en étudier la relation entre EC et le diamètre sous écorce (D13_sec).

La première étape a constitué à calculer le diamètre sous écorce de chaque arbre vivant présent dans la base de donnée.

$$D13_sec = D13 - 2 EC \quad (1)$$

Une régression linéaire a alors été ajustée pour chaque essence entre le logarithme de EC et celui de D13_sec et les coefficients de ces régressions sont récupérés (**Figure A.IV.4.1**).

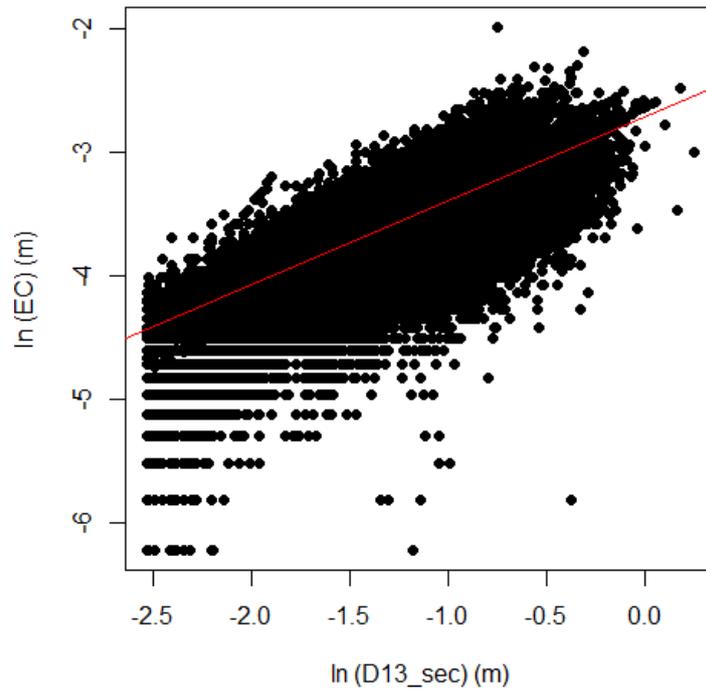


Figure A.IV.4.1 Relation entre le logarithme de l'épaisseur de l'écorce (EC) et le logarithme du diamètre à 1,30 m sous écorce (D13_sec) pour le douglas. En rouge : régression linéaire.

A.IV.4.2 Estimation de la circonférence à 1,30 m à partir de la circonférence à la base

La valeur de la circonférence à 1,30 m (C13) n'a pas toujours été mesurée sur les arbres morts. Cependant, la valeur de la circonférence à la base (C0) est renseignée. Comme nous souhaitons travailler, pour le calcul des flux, à partir des données de diamètre et de circonférence à 1,30 m, une estimation de C13 en fonction de C0 a dû être effectuée.

Une régression linéaire par essence a été effectuée entre les logarithmes de C13 et de C0 des arbres vivants (**Figure A.IV.4.2**).

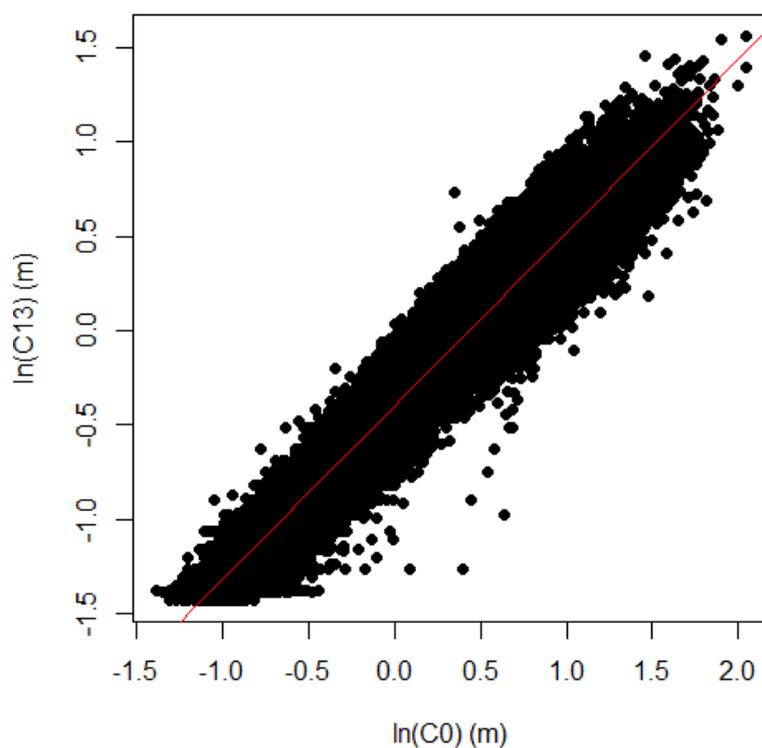


Figure A.IV.4.2 Relation entre le logarithme de la circonférence à 1,30 m (C13) et le logarithme de la circonférence à la base (C0) du chêne sessile. En rouge : régression linéaire.

Annexe IV.5. Cas particulier : non disponibilité des IR

En AM, 2,6 millions arbres ont été inventoriés. 95,0% d'entre eux ont un IR10 renseigné et non nul. Pour les 5% restant, l'IR10 n'a pas pu être utilisé et l'IR5 (dans 3,4% des cas) ou l'IRN (quand les cernes n'étaient pas lisibles sur 5 ans, l'incrément radial a été relevé sur les N années lisibles) si l'IR5 était également non renseigné ou nul (0,1% des cas) a été utilisé. Dans 98,5% un incrément radial était donc disponible. Pour les 1,5% restant, une estimation de celui-ci a été nécessaire. Pour cela, une moyenne des IR annualisés des arbres de même catégorie (essence, département, année d'inventaire, propriété et classe de diamètre) a été calculée. Dans le cas où l'arbre était seul dans sa catégorie, les critères ont été enlevés (dans l'ordre de suppression : classe de diamètre, propriété, année d'inventaire et département). Pour le cas du noyer dont aucun IR n'a été mesuré, une moyenne par département et classe de diamètre a été utilisée.

De même, pour l'IR5 à t_{1i} , si celui-ci n'était pas disponible, l'IRN était utilisé ou l'IR10 si l'IRN n'était pas renseigné. Si aucun des trois n'était renseigné, une estimation, reposant sur la même logique que précédemment, était utilisée.

Annexe IV.6. Diagrammes des flux

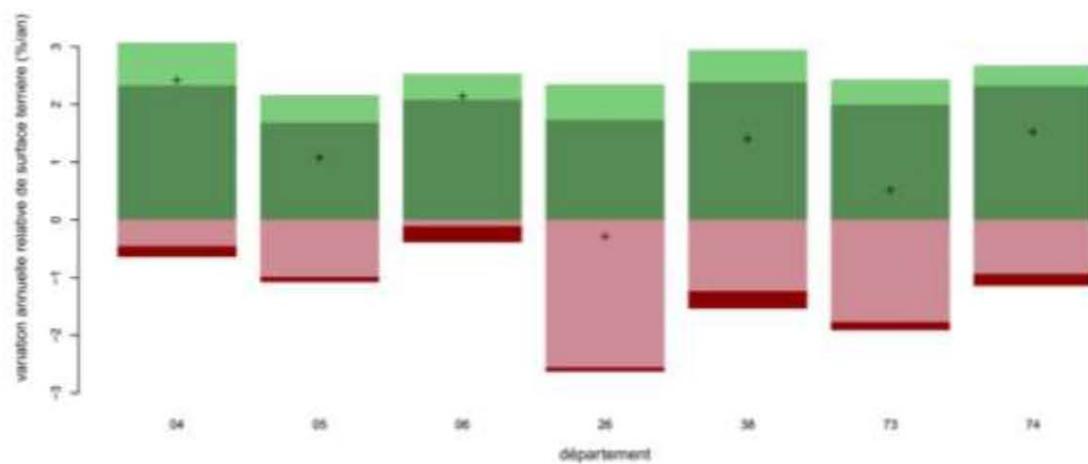
Les flux relatifs annuels calculés en partie IV par département x propriété et département x propriété x essence ont été représentés par des diagrammes. L'ensemble de ces diagrammes sont représentés à partir de la page suivante.

La légende étant la même pour chaque graphique, elle n'est présentée qu'une seule fois (ci-dessous) et non à chaque graphique.

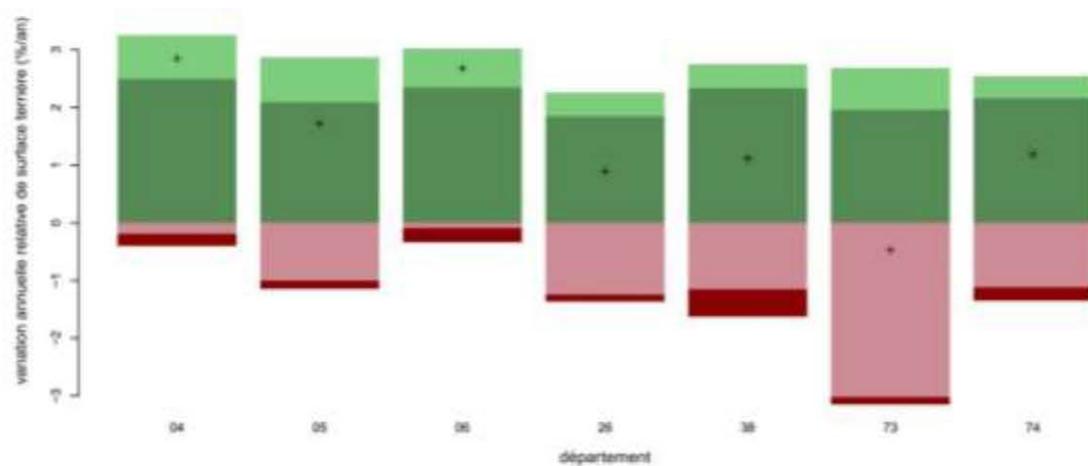


Figure A.IV.6.1 Légende des histogrammes des flux par département x propriété et département x propriété x essence

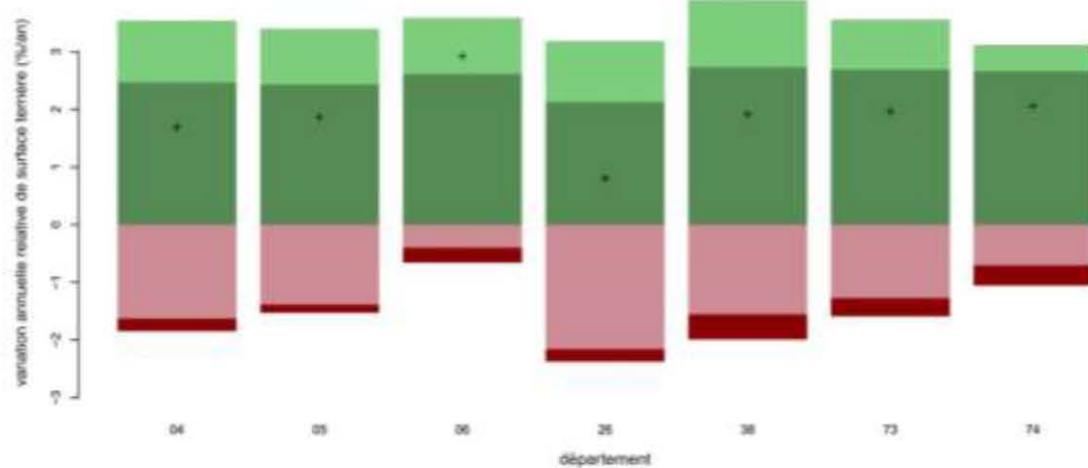
AI . C



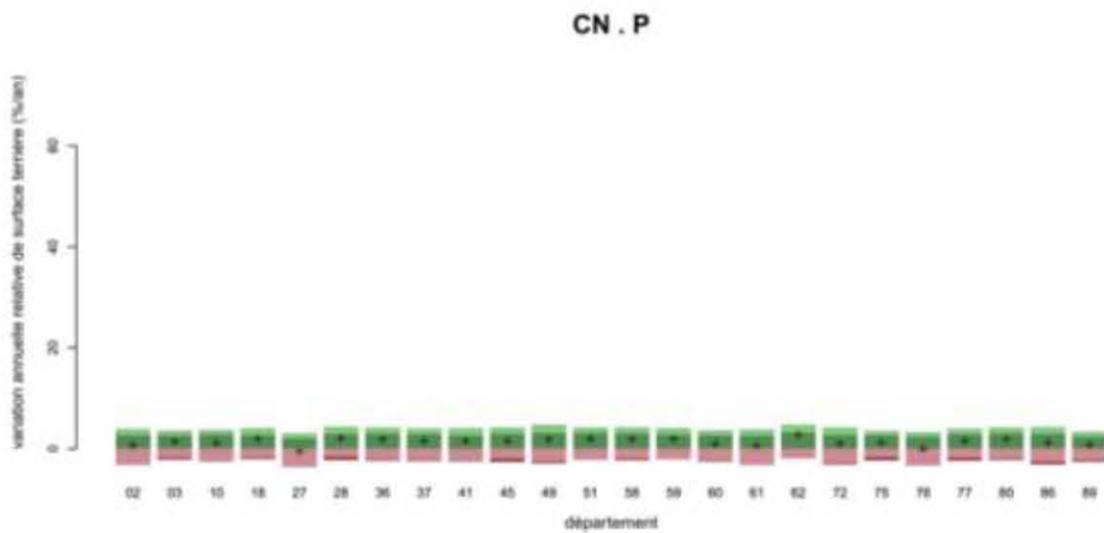
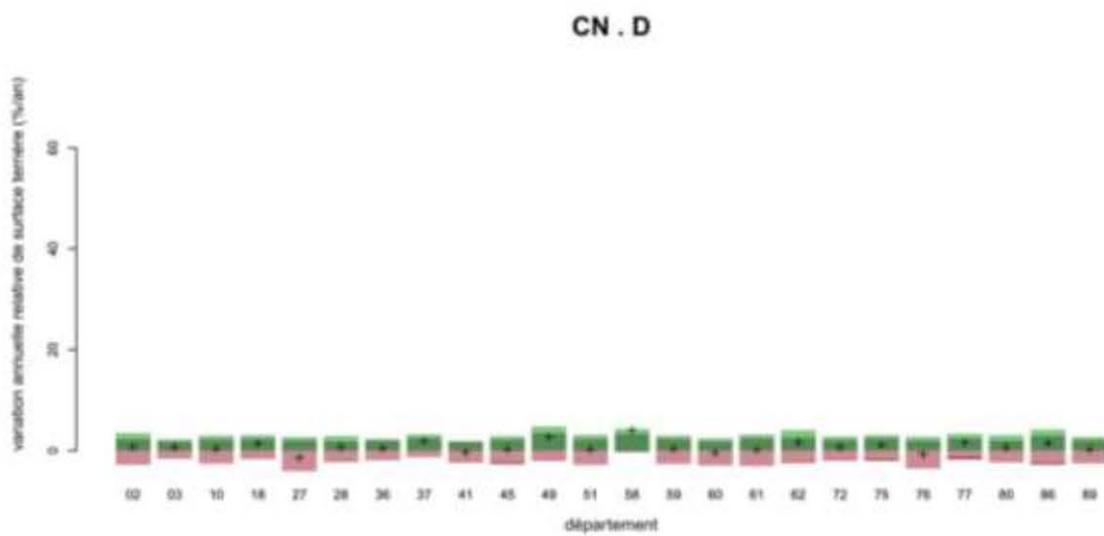
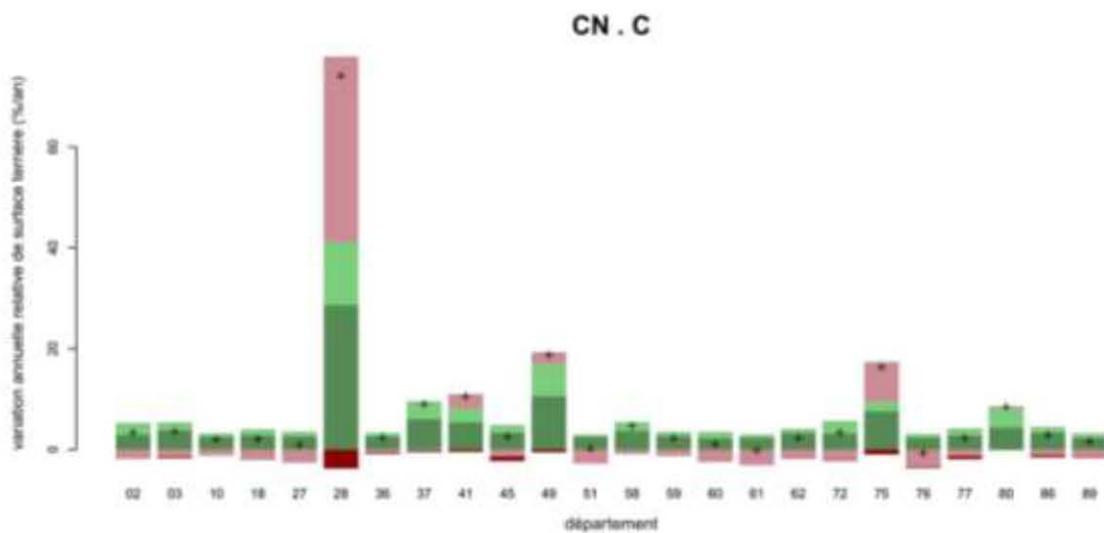
AI . D

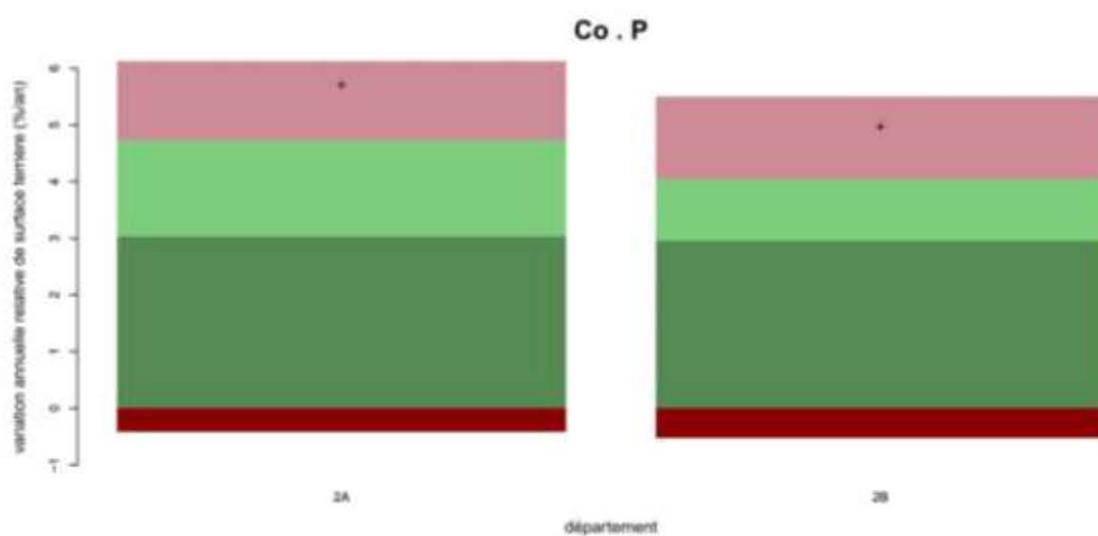
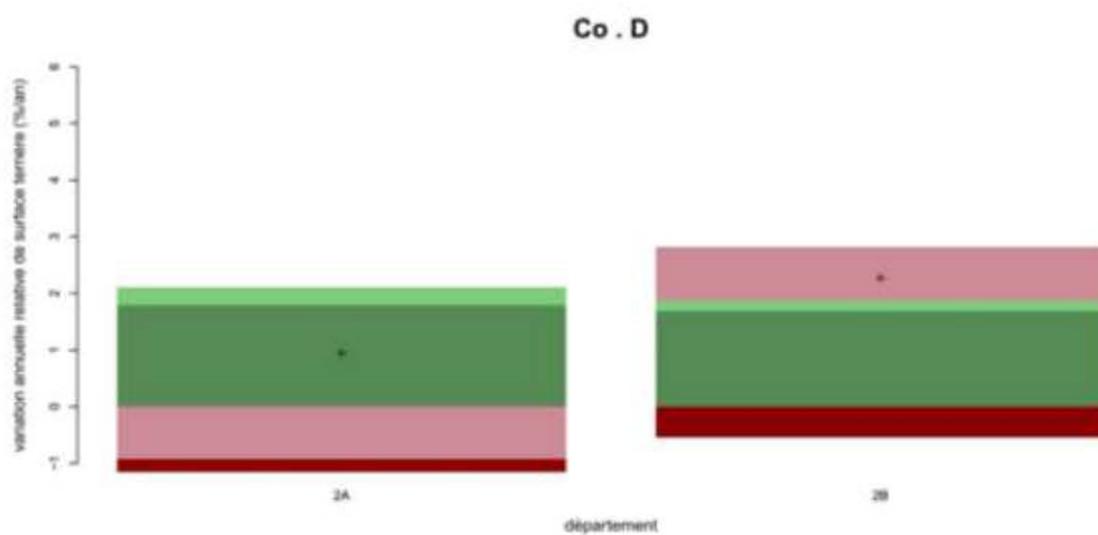
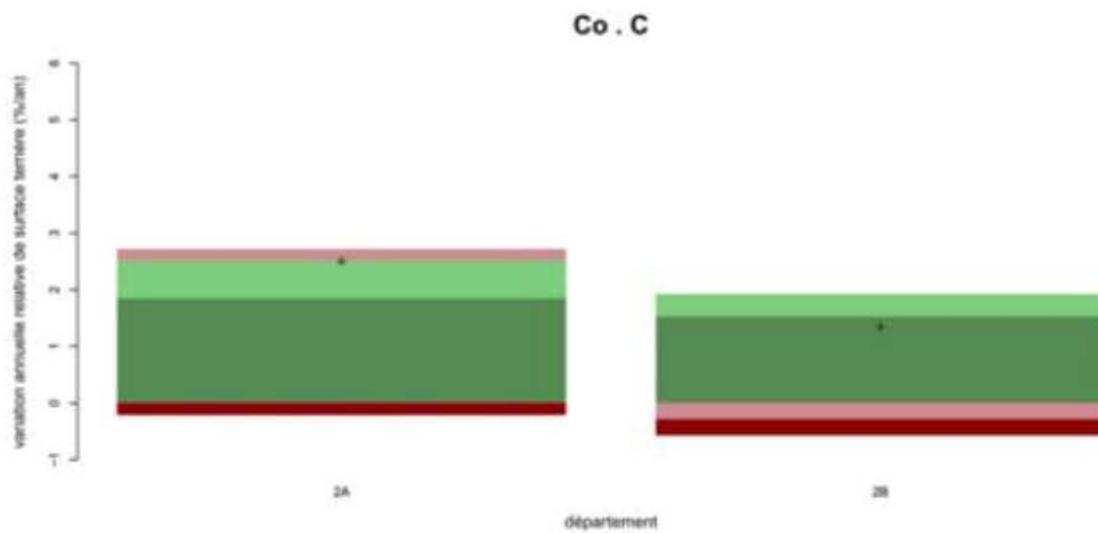


AI . P

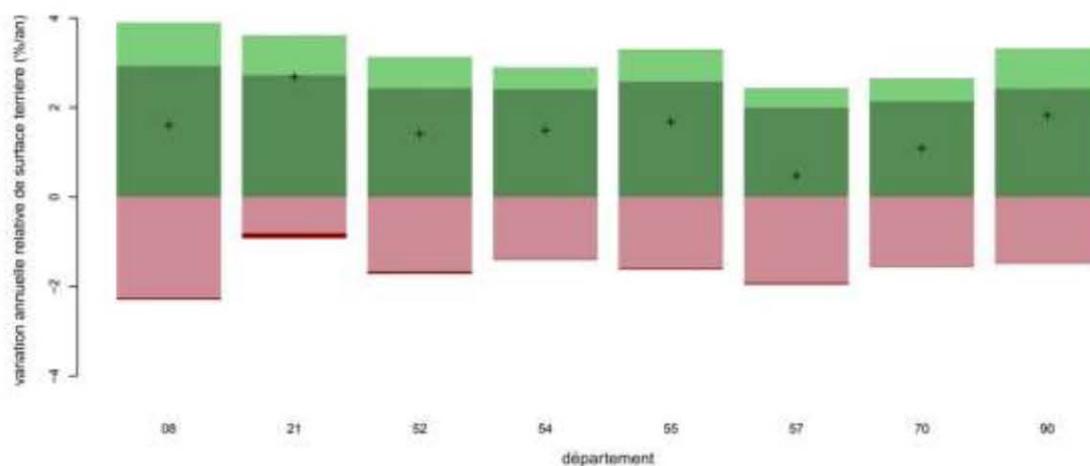


Annexe IV.6

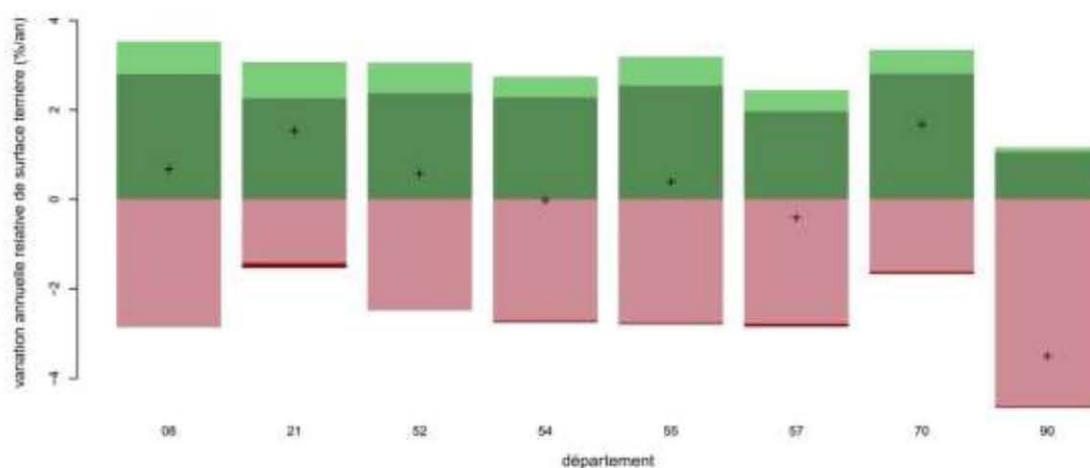




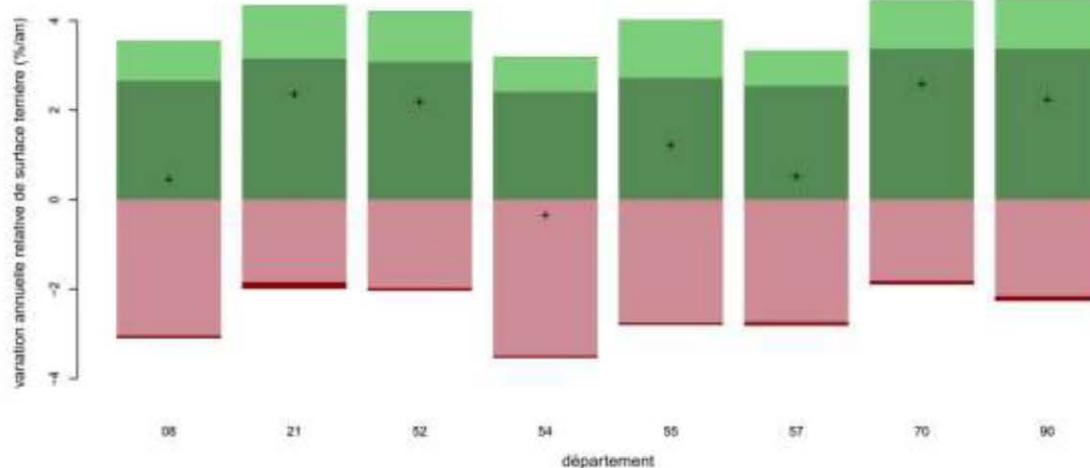
GE . C

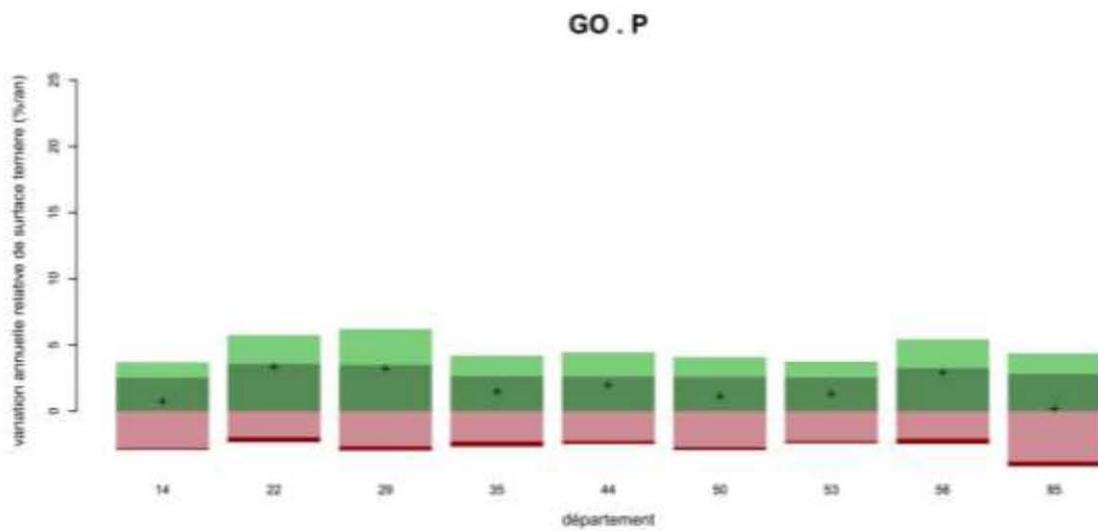
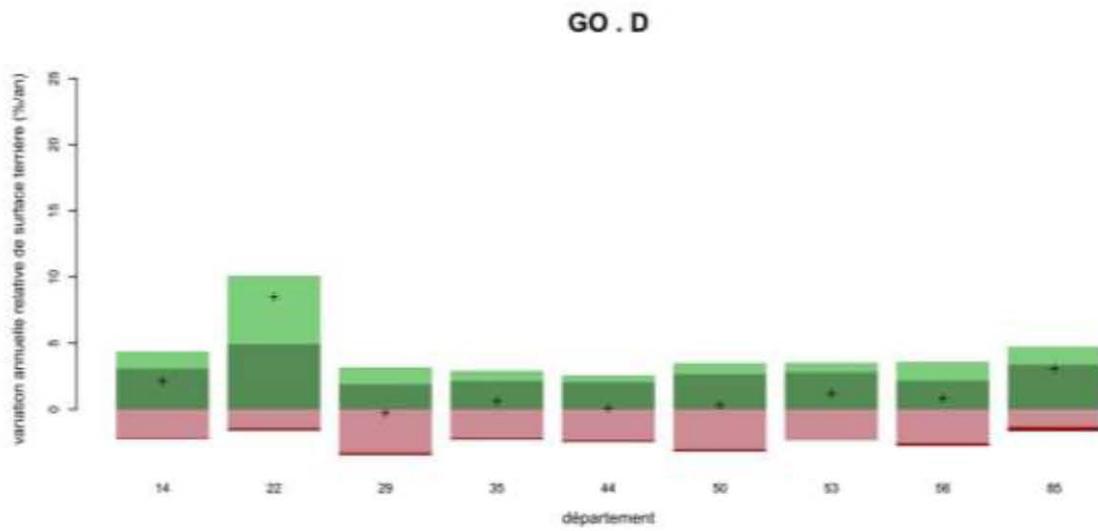
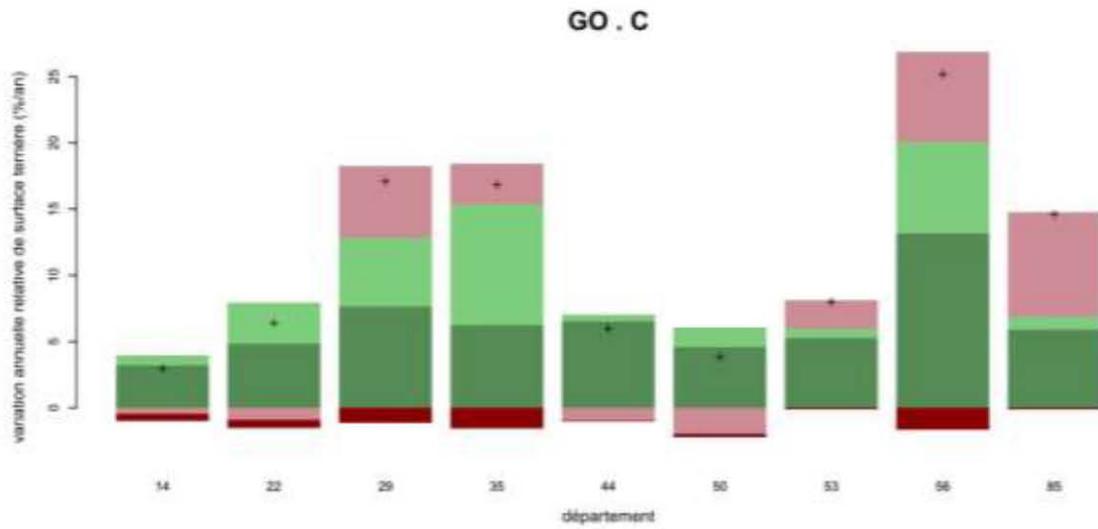


GE . D

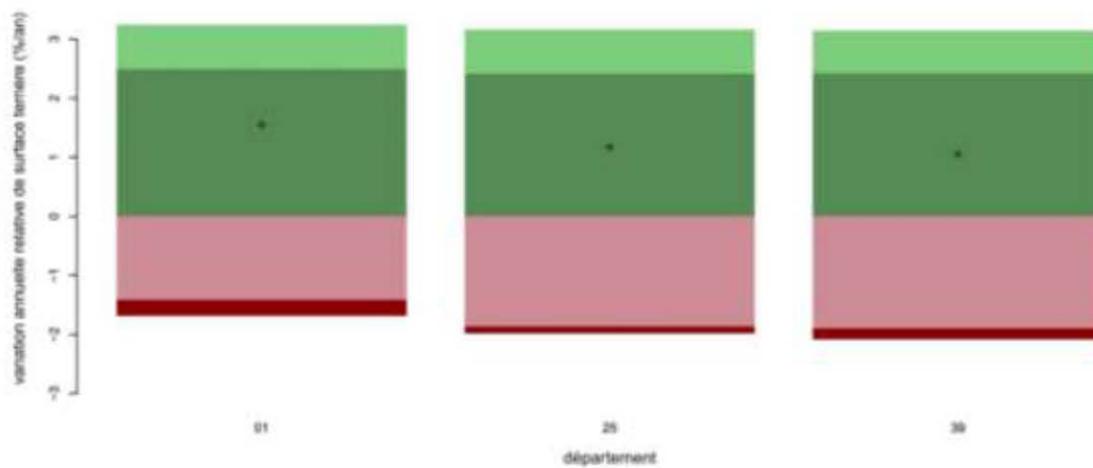


GE . P

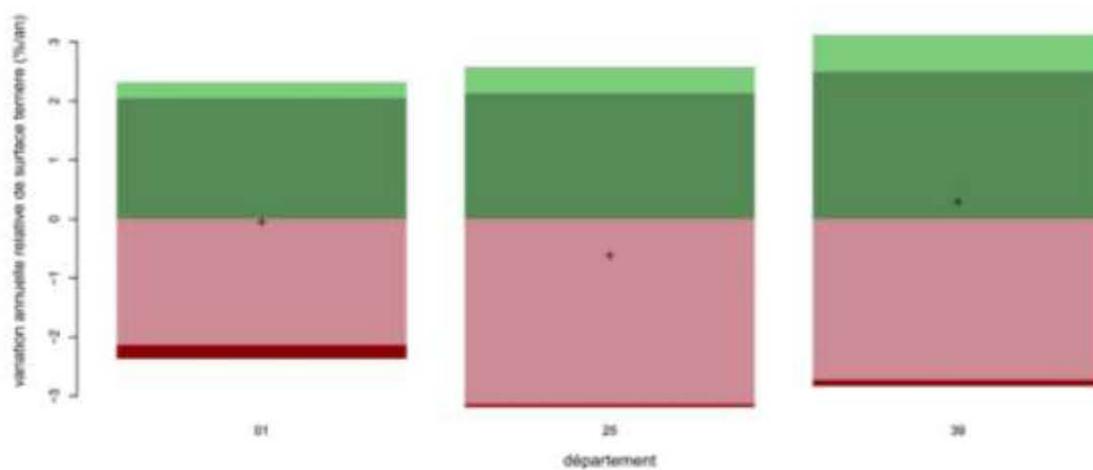




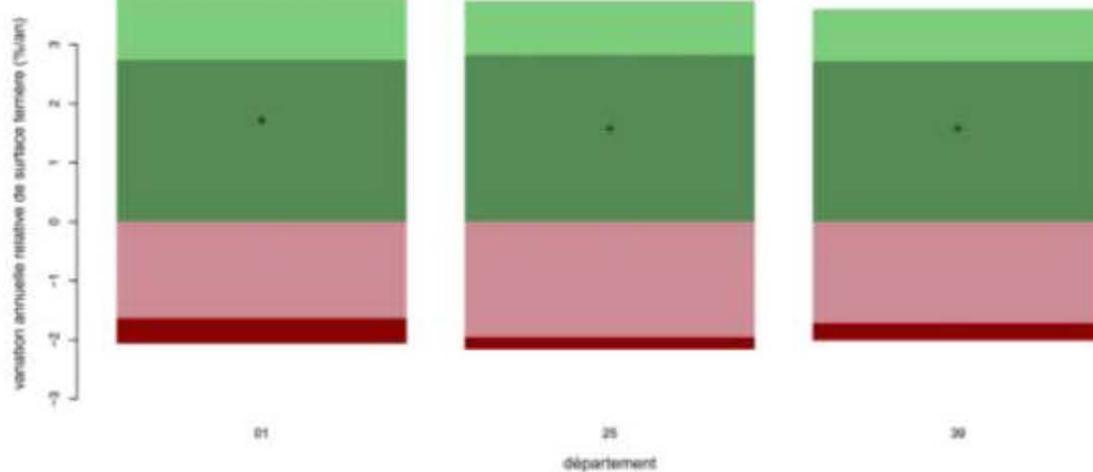
Ju . C



Ju . D

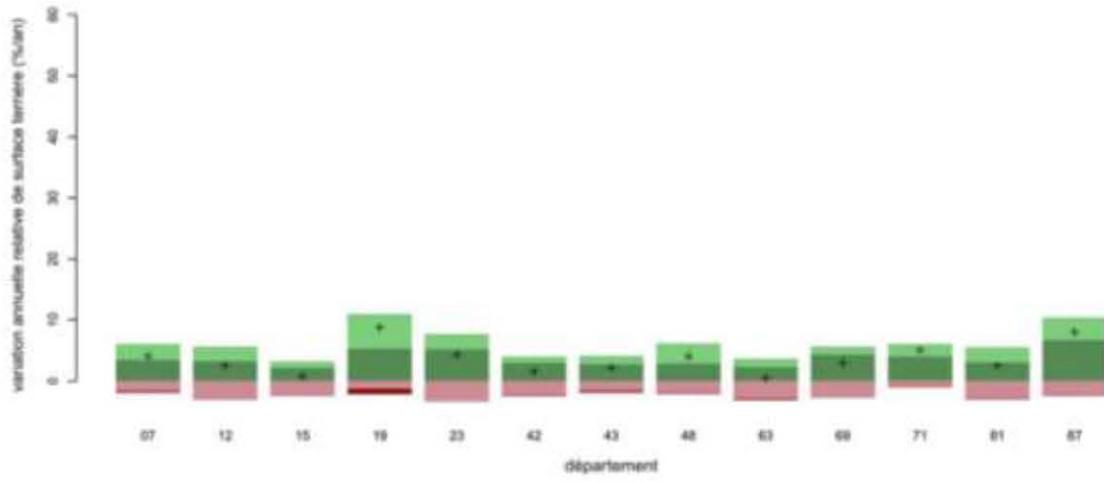


Ju . P

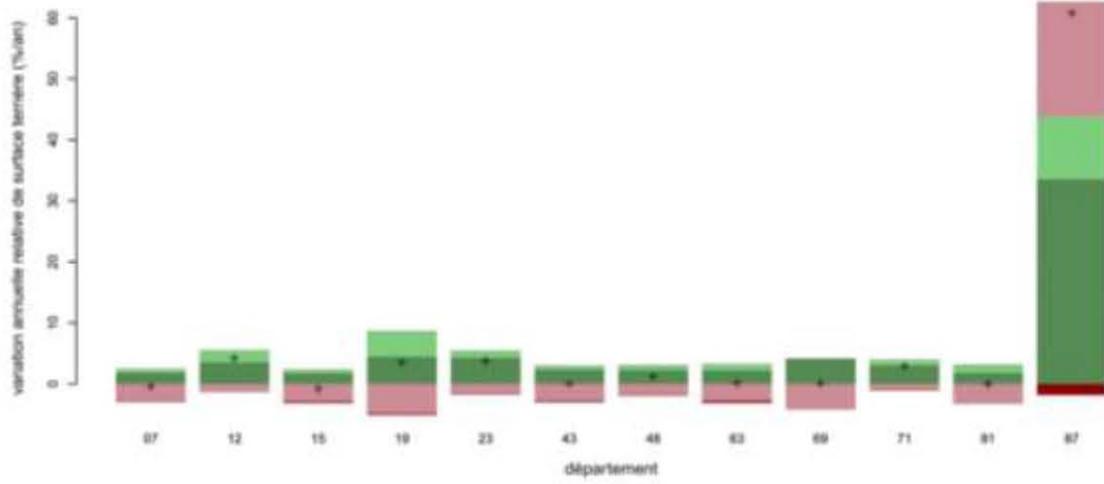


Annexes de la partie IV

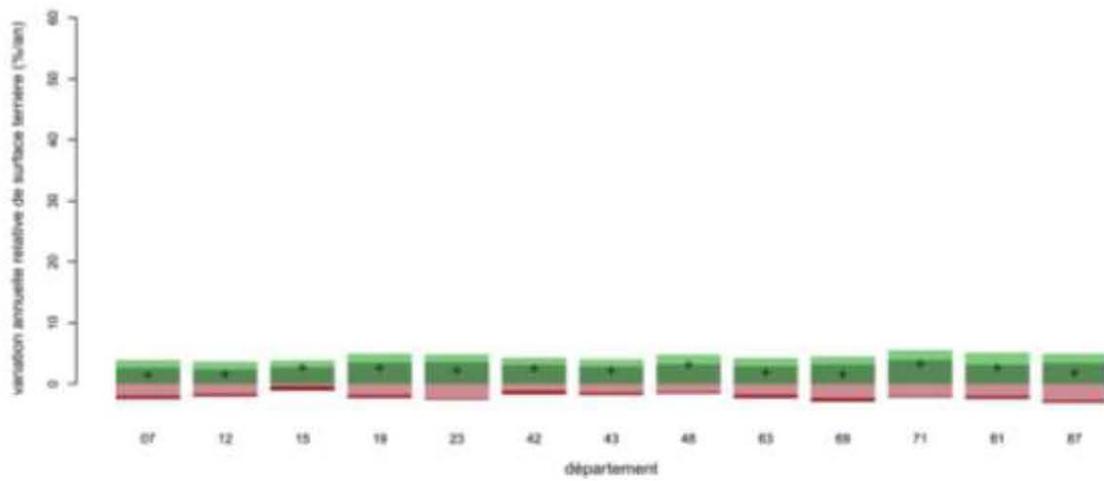
MC . C

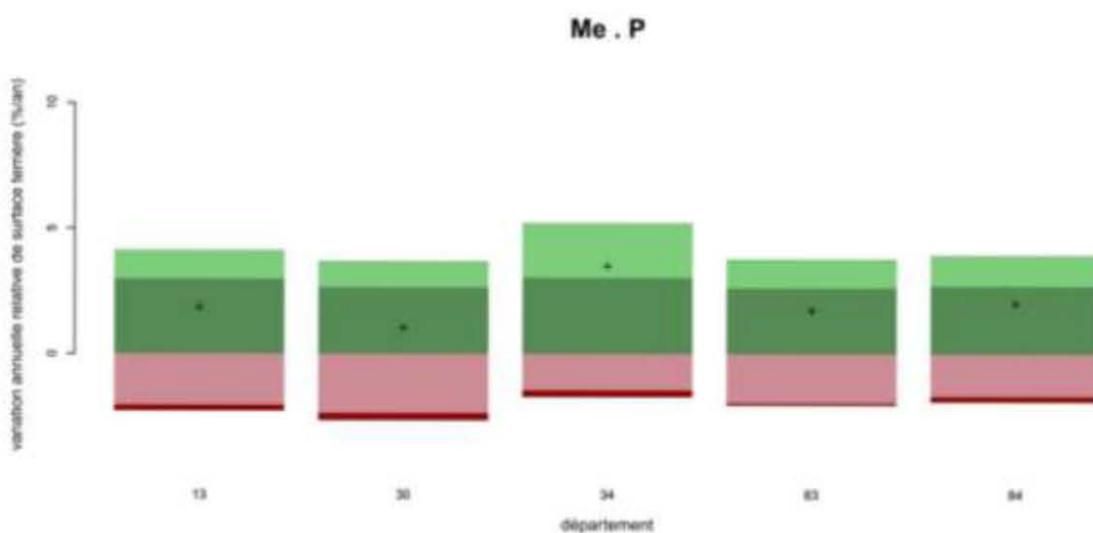
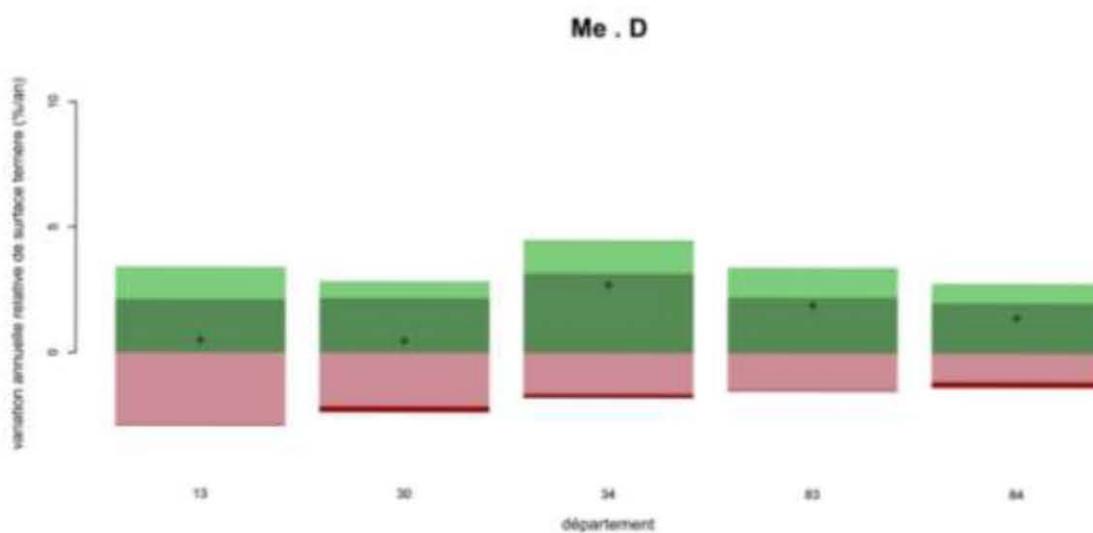
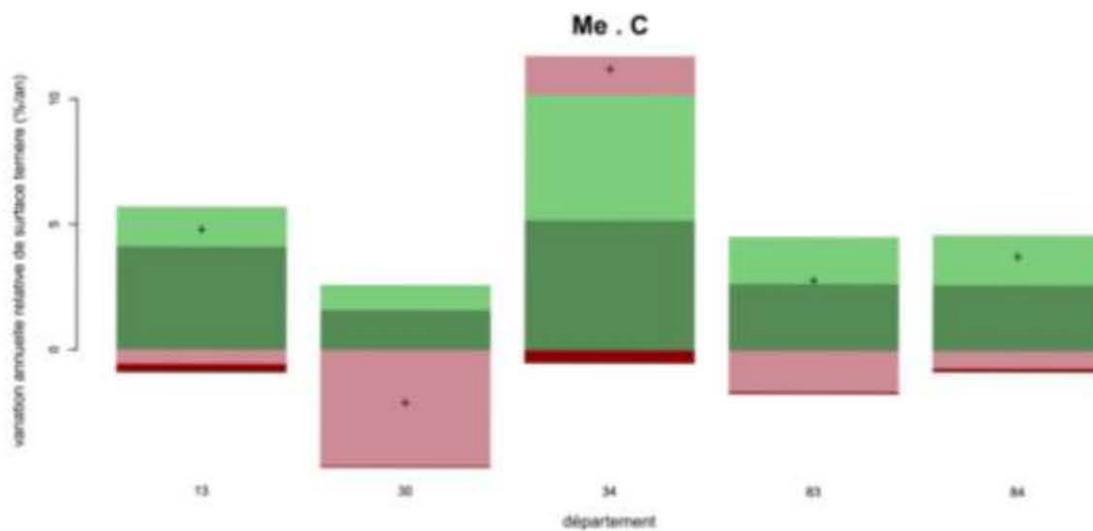


MC . D

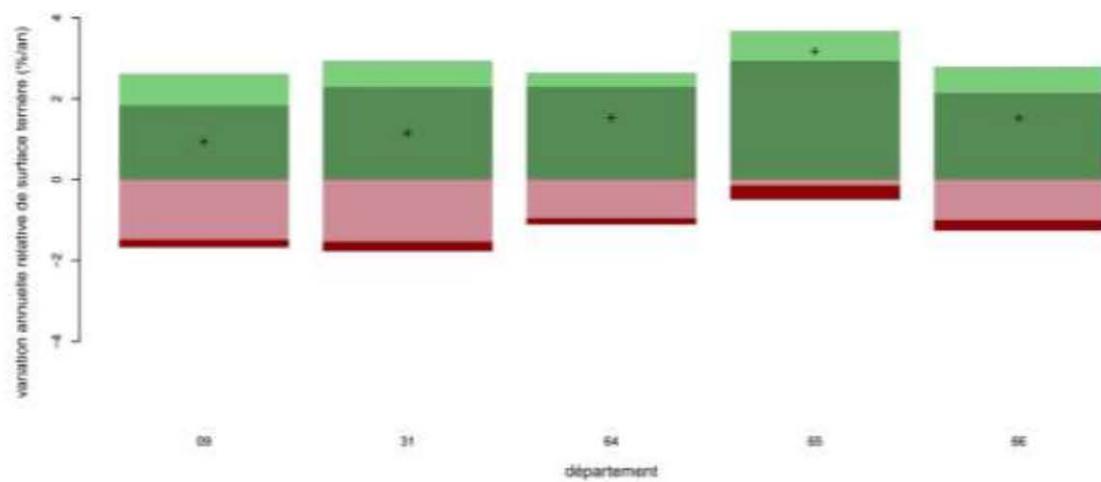


MC . P

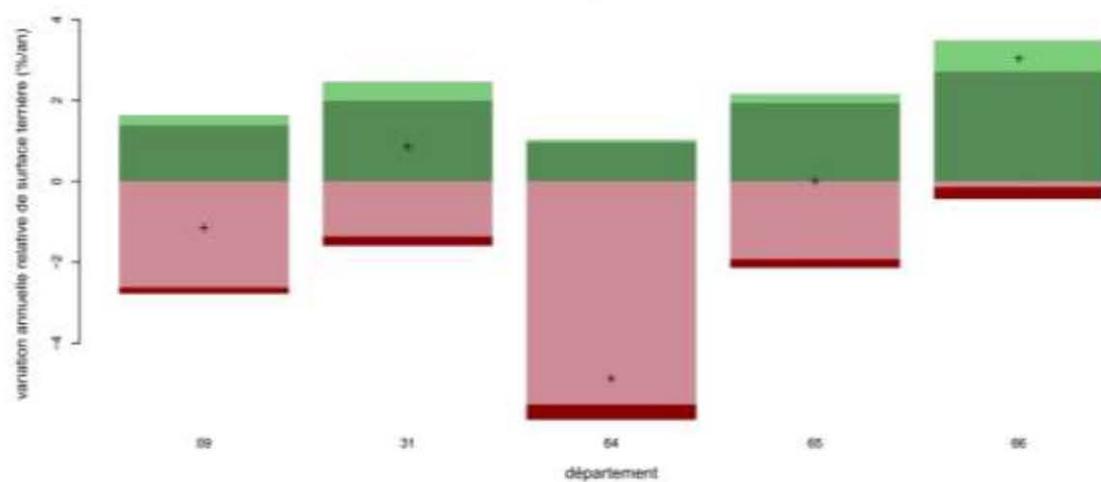




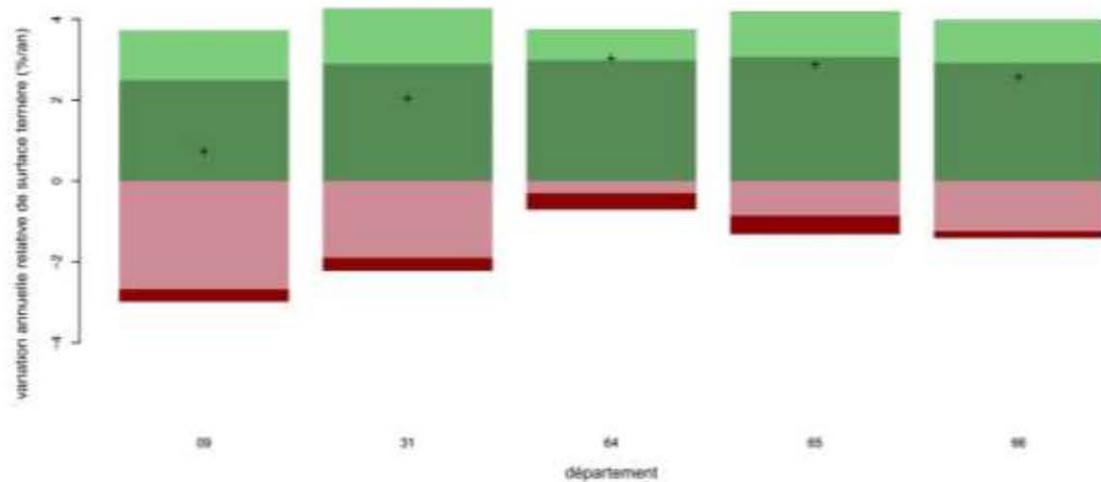
Py . C

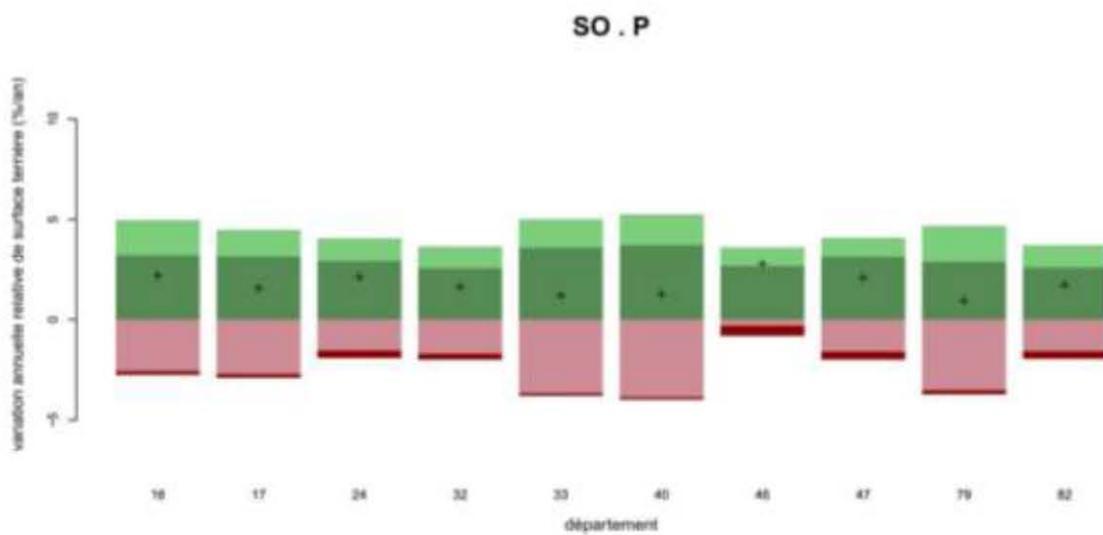
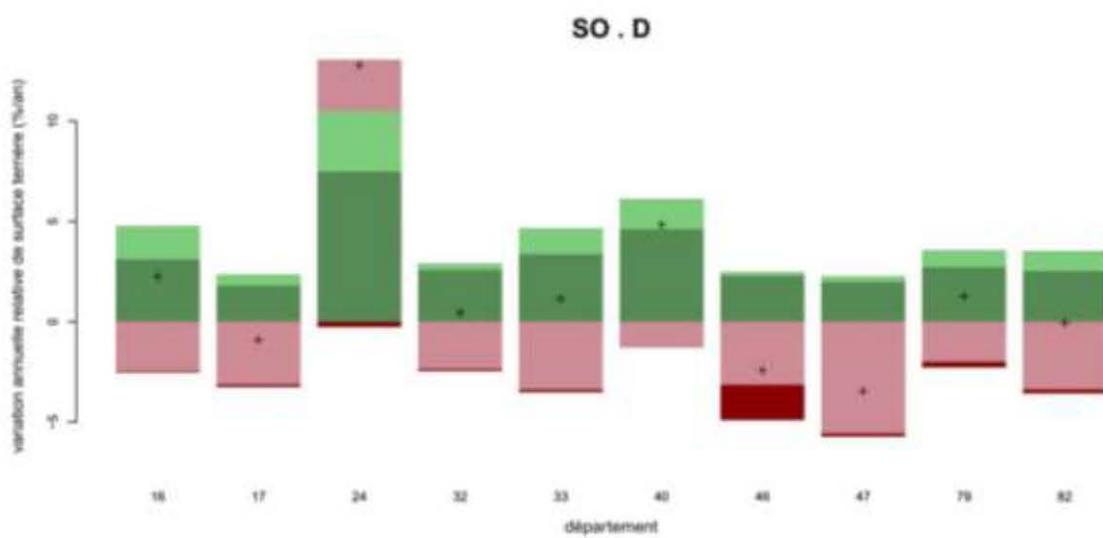
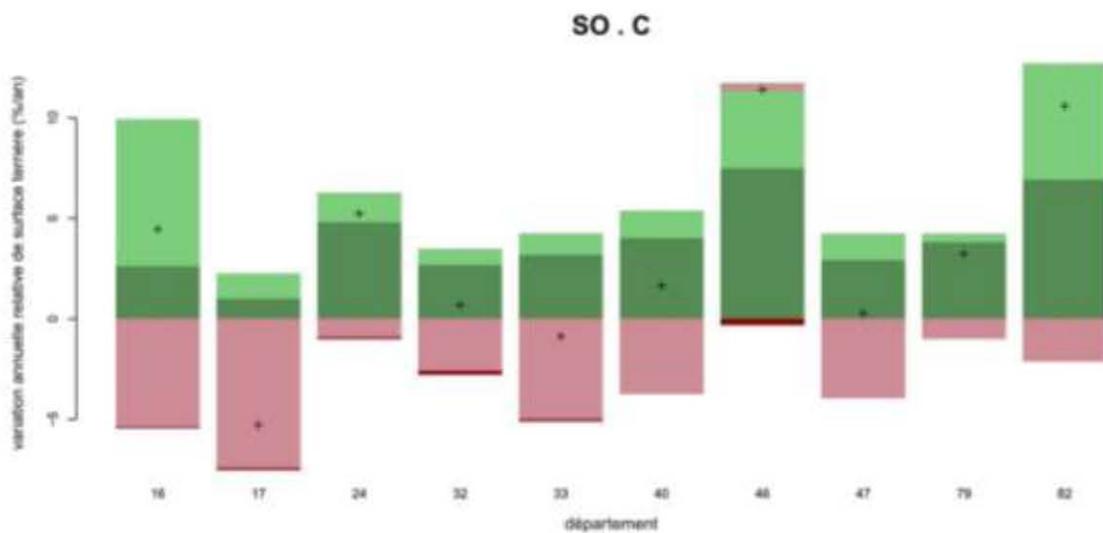


Py . D

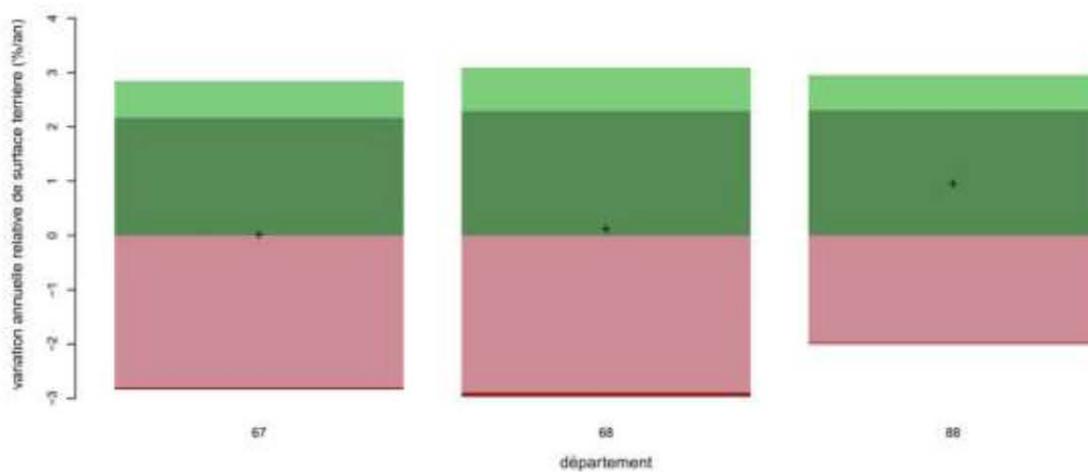


Py . P

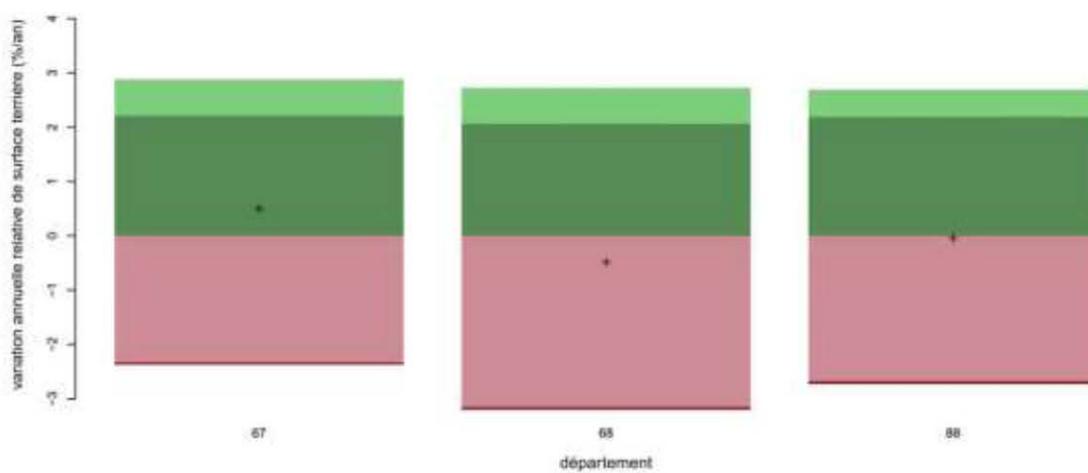




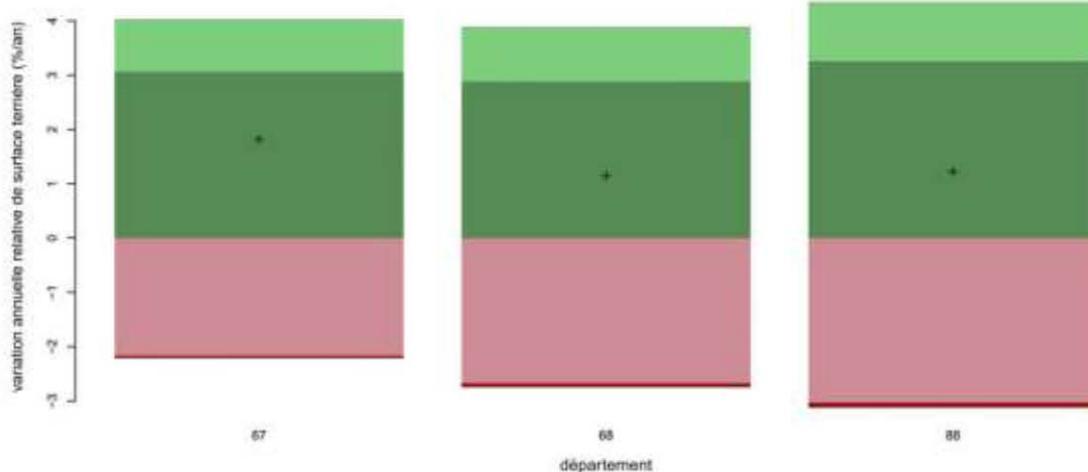
Vo . C



Vo . D



Vo . P



AI . C . AA



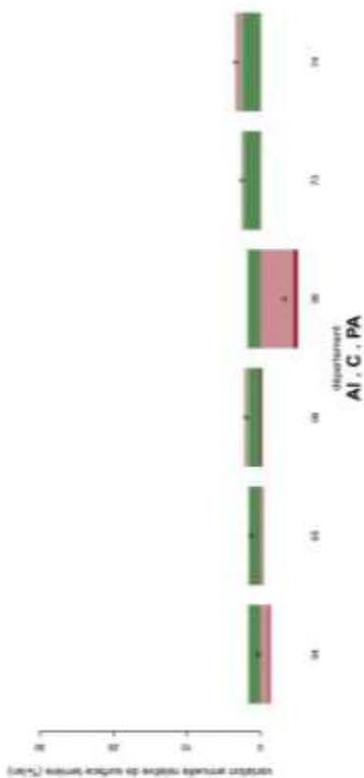
AI . C . FS



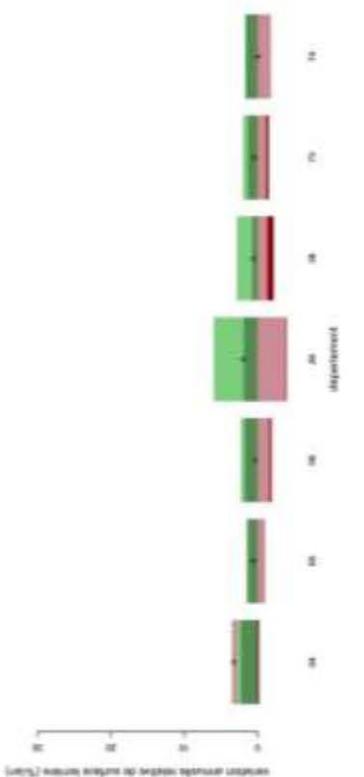
AI . C . DF



AI . C . LD

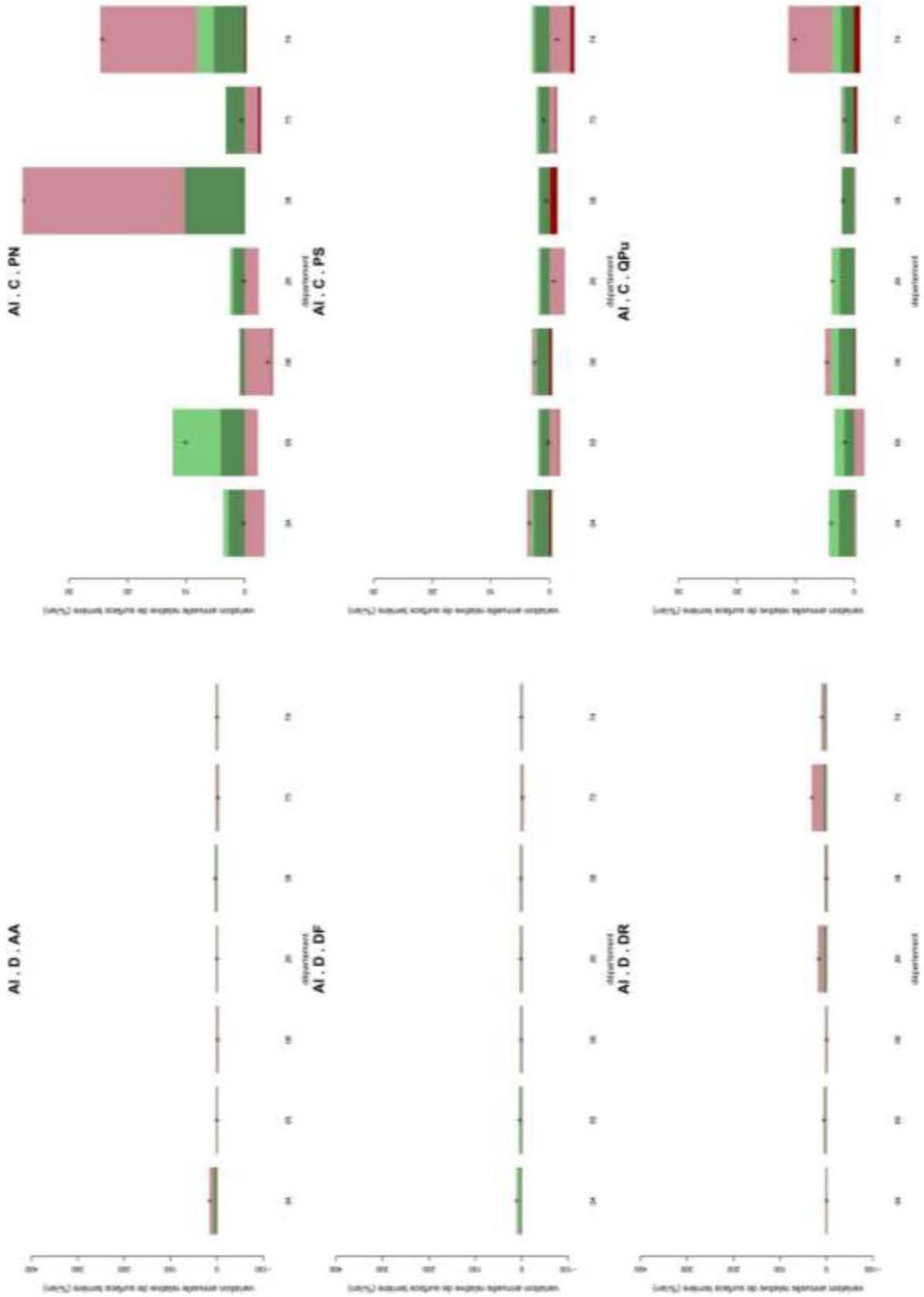


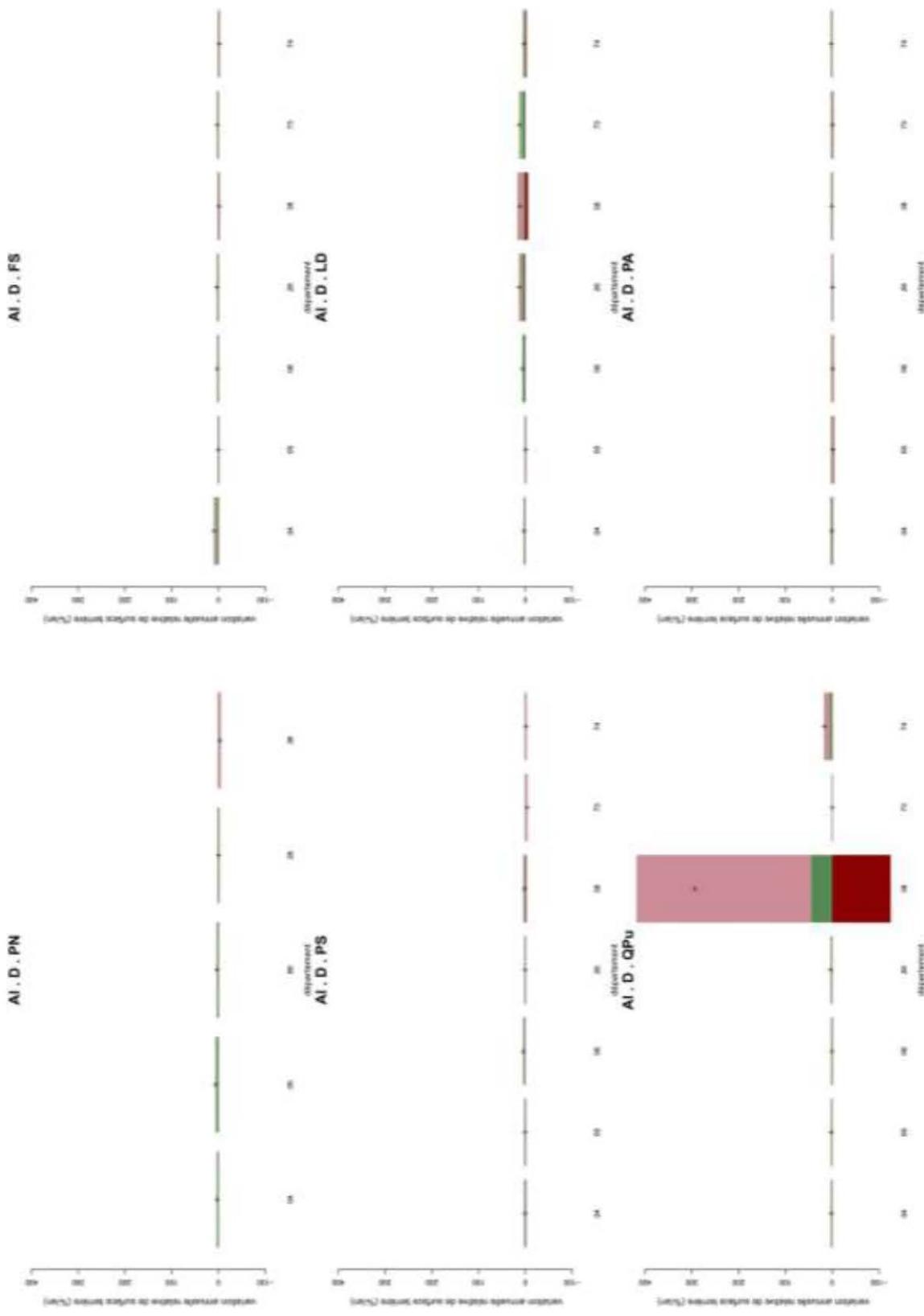
AI . C . DR

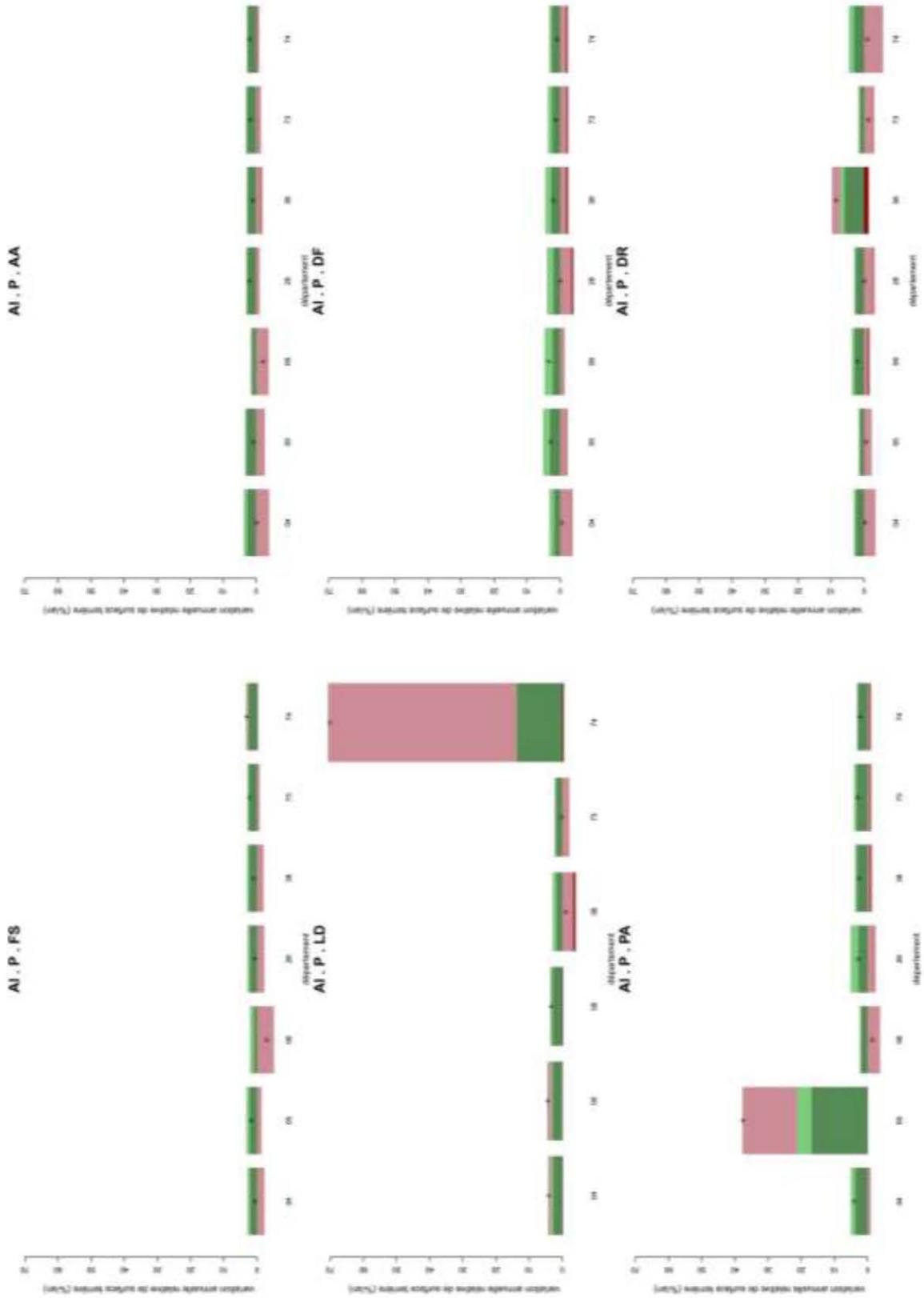


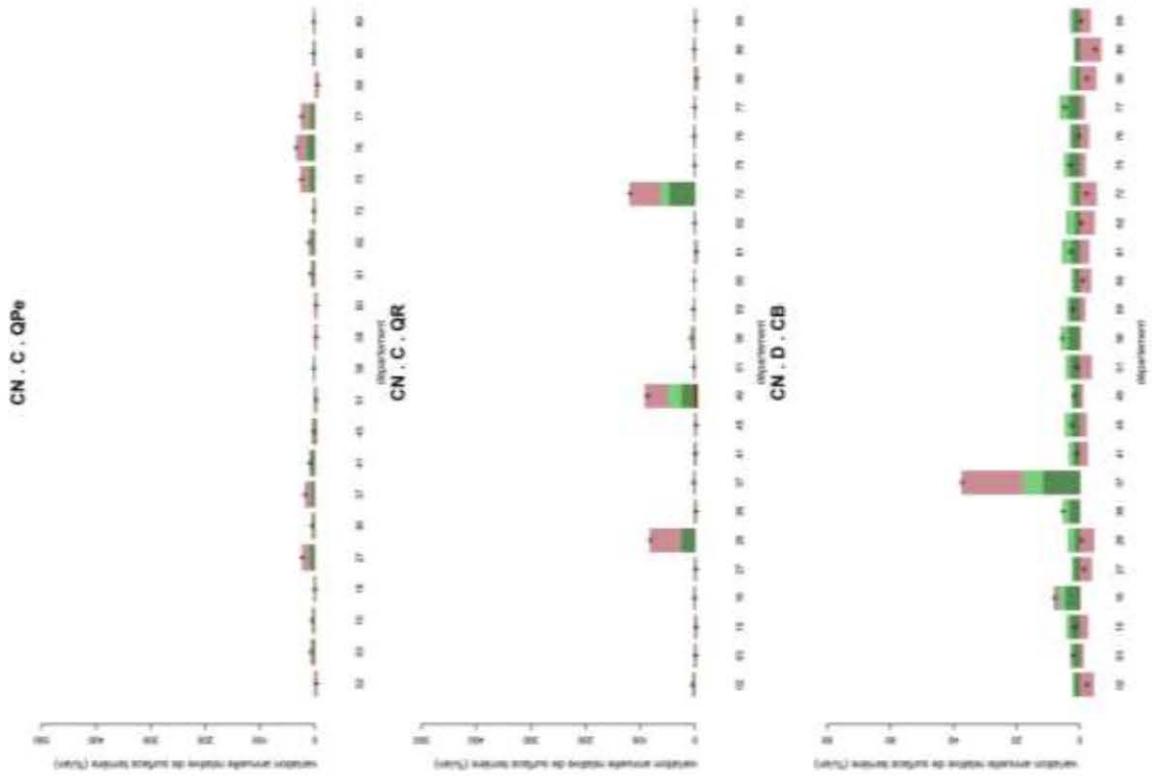
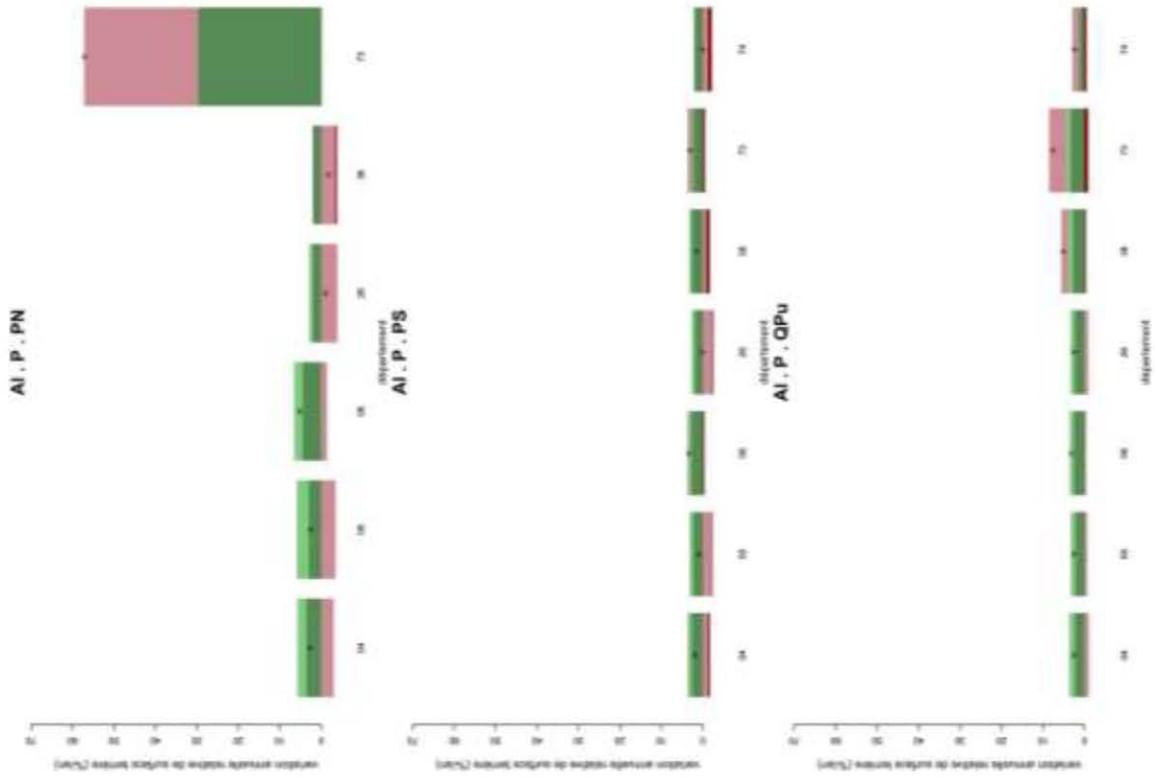
AI . C . PA







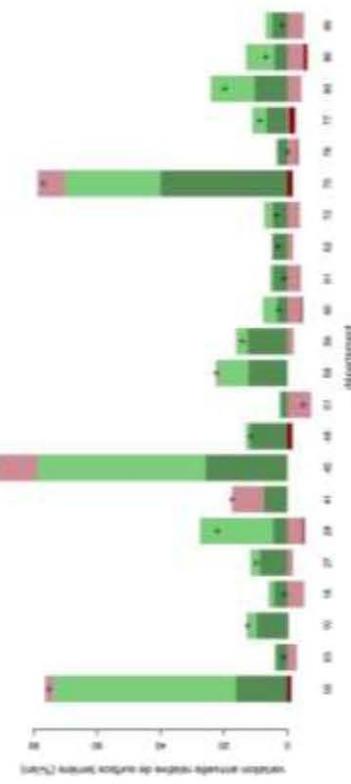




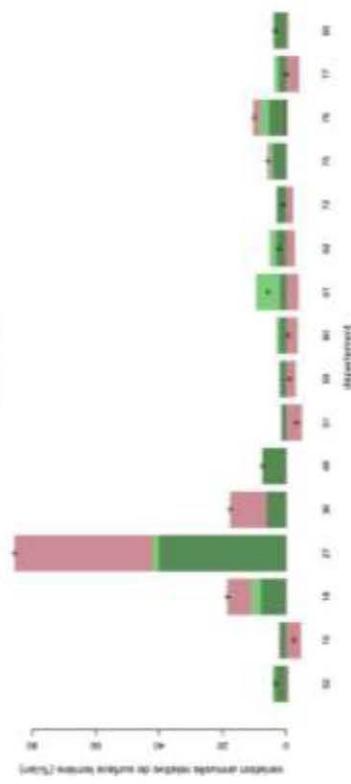
CN . D . DF



CN . D . DR



CN . D . FE



CN . D . FS

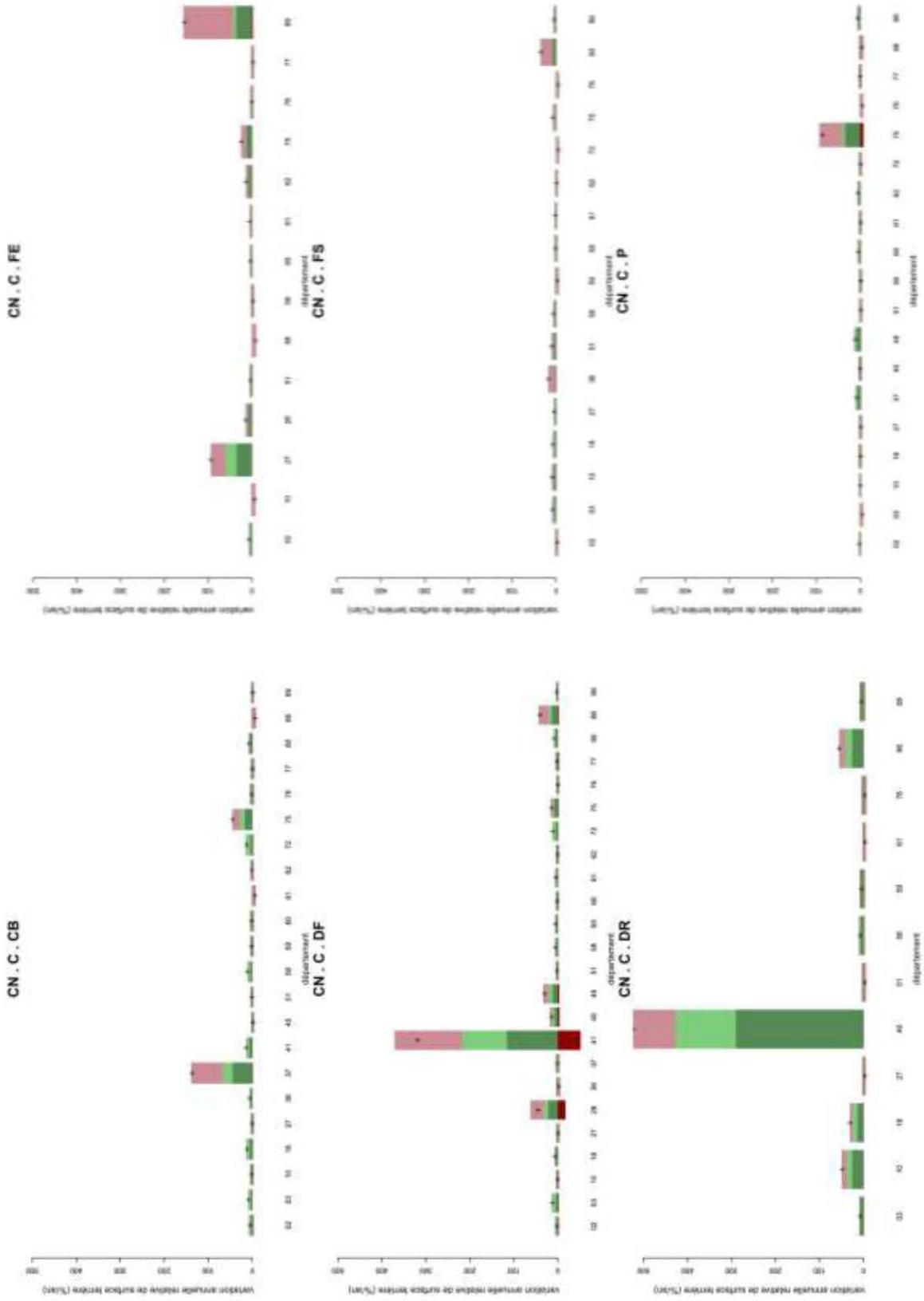


CN . D . P

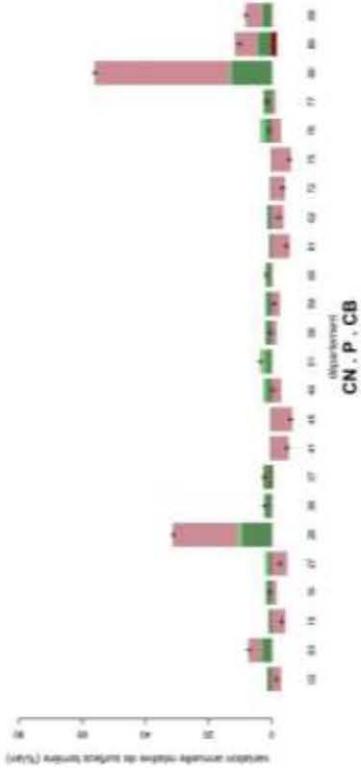


CN . D . QPe

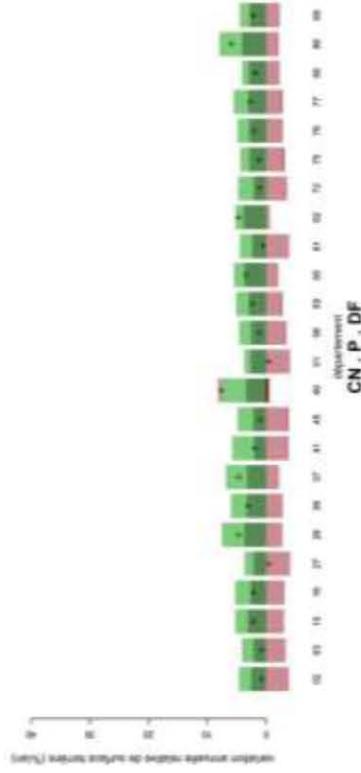




CN . D . OR



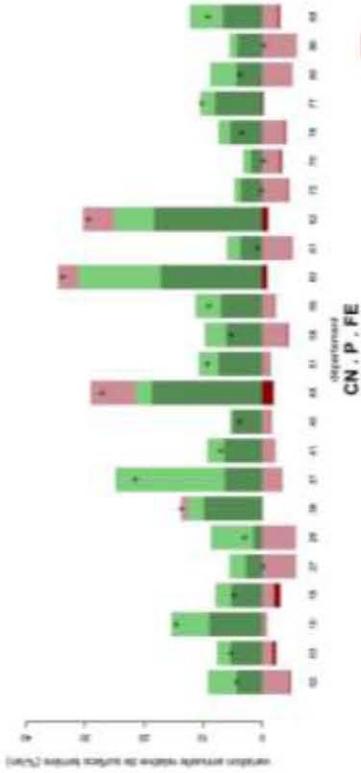
CN . P . CB



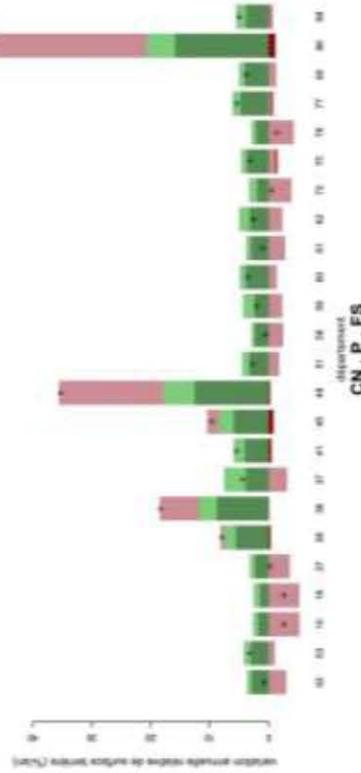
CN . P . DF



CN . P . DR



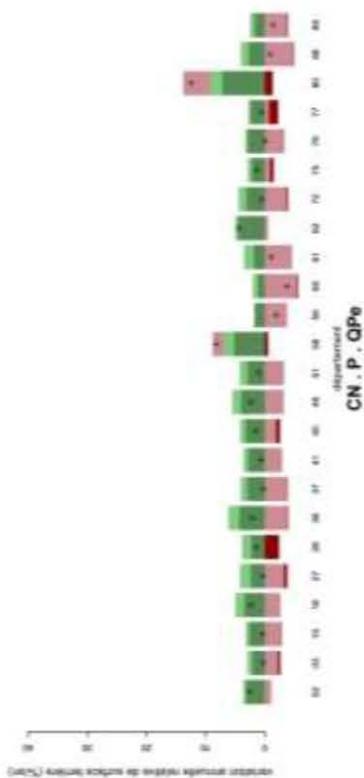
CN . P . FE



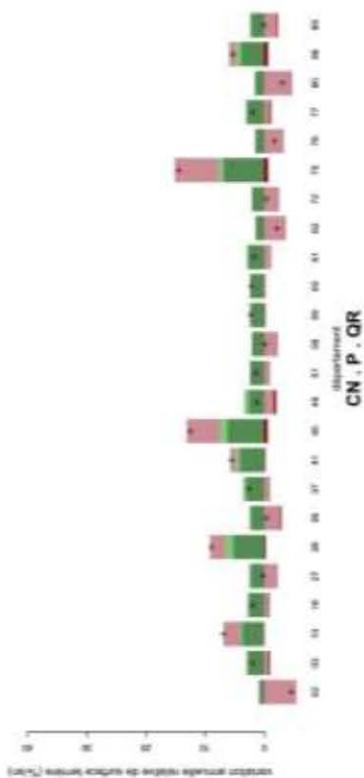
CN . P . FS



CN . P . P



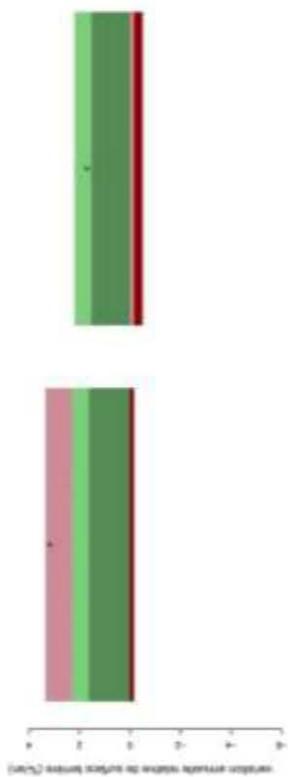
CN . P . QPe



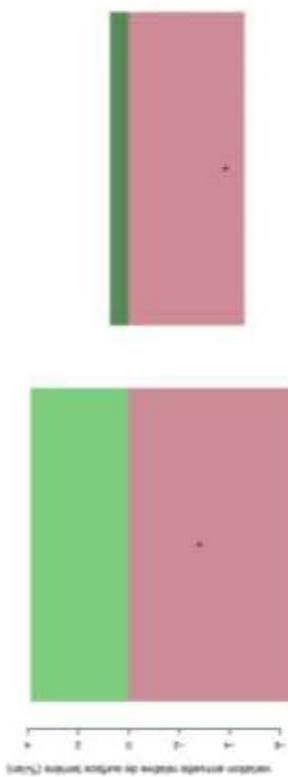
CN . P . QR



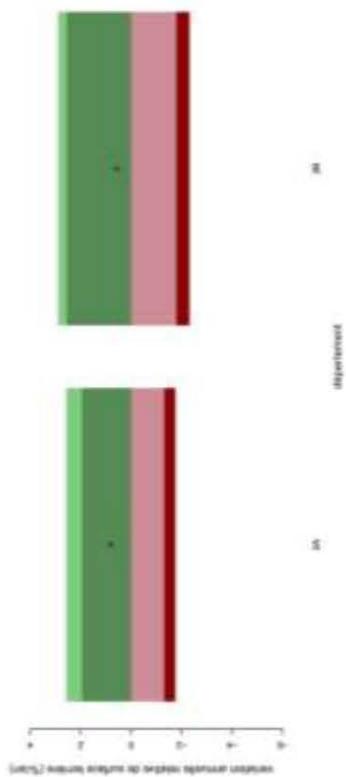
Co . C . DF

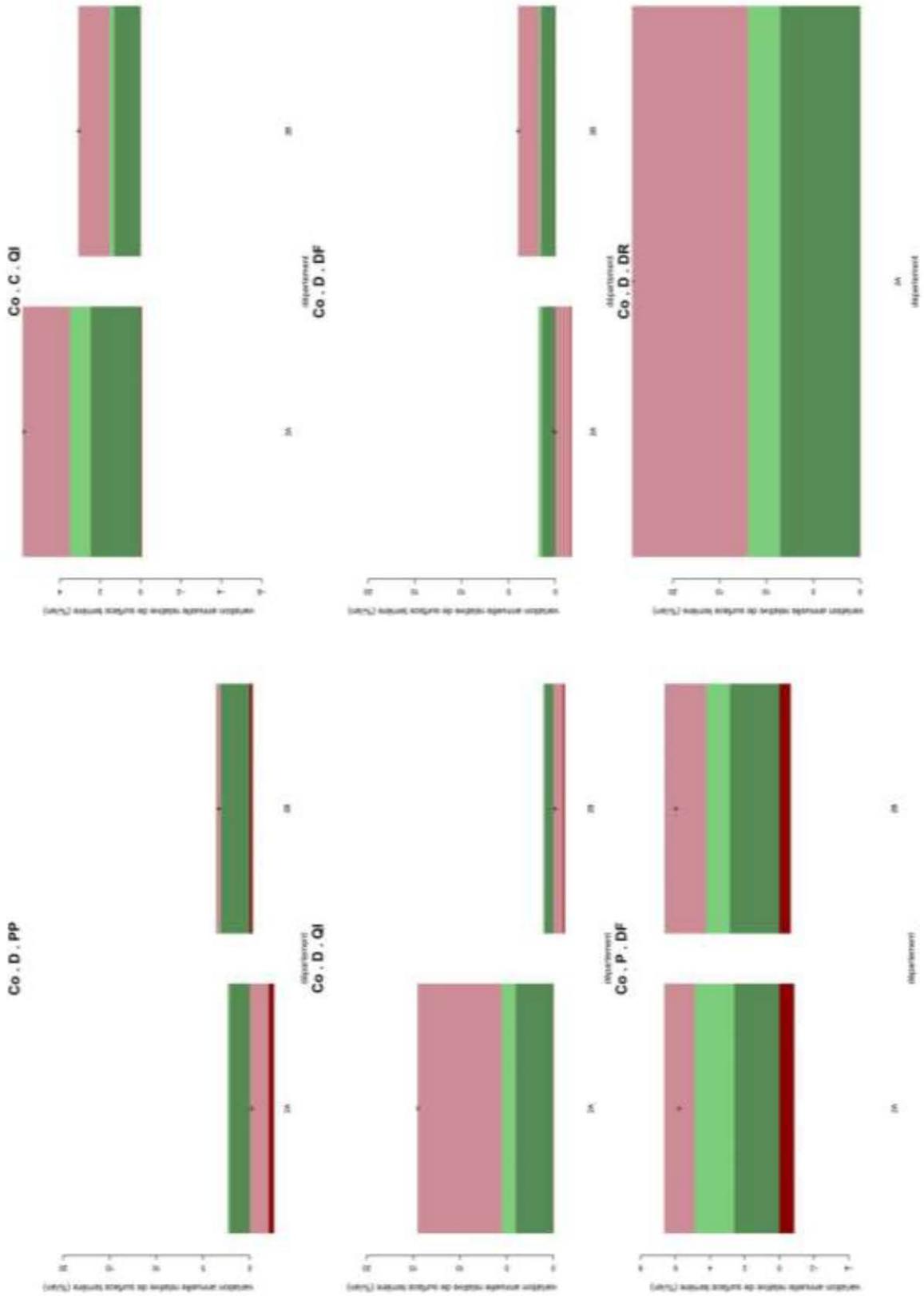


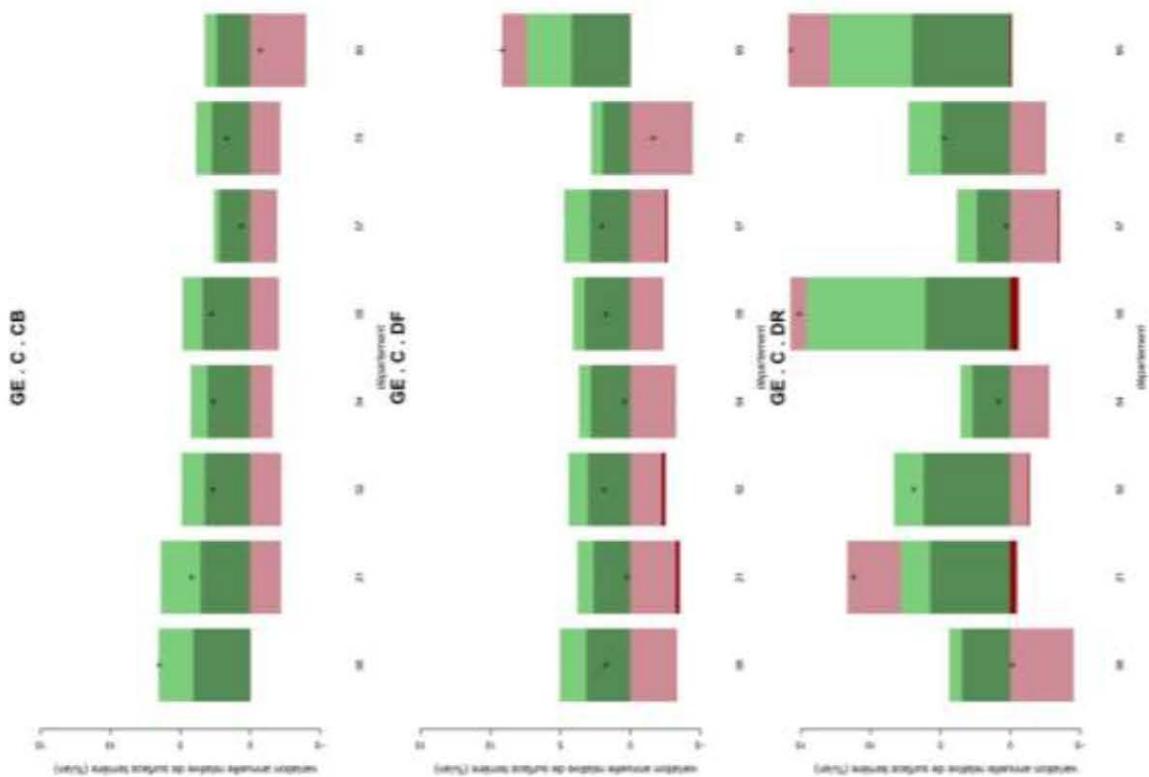
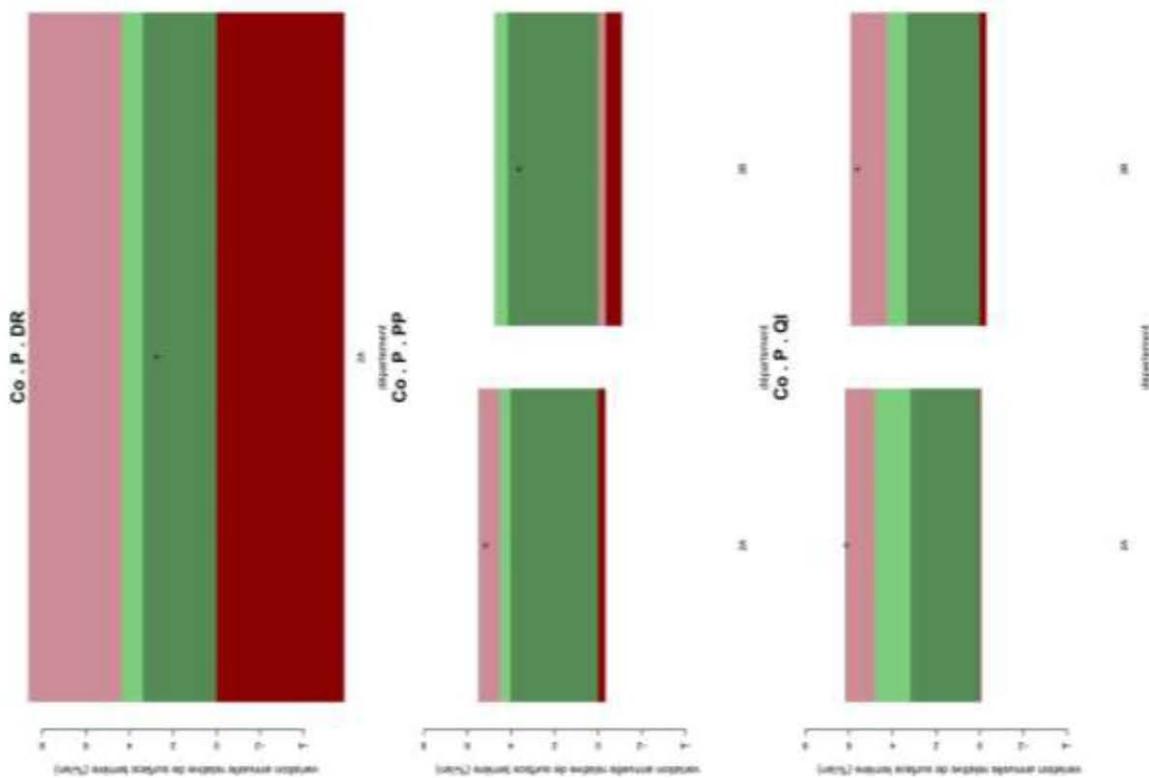
Co . C . DR

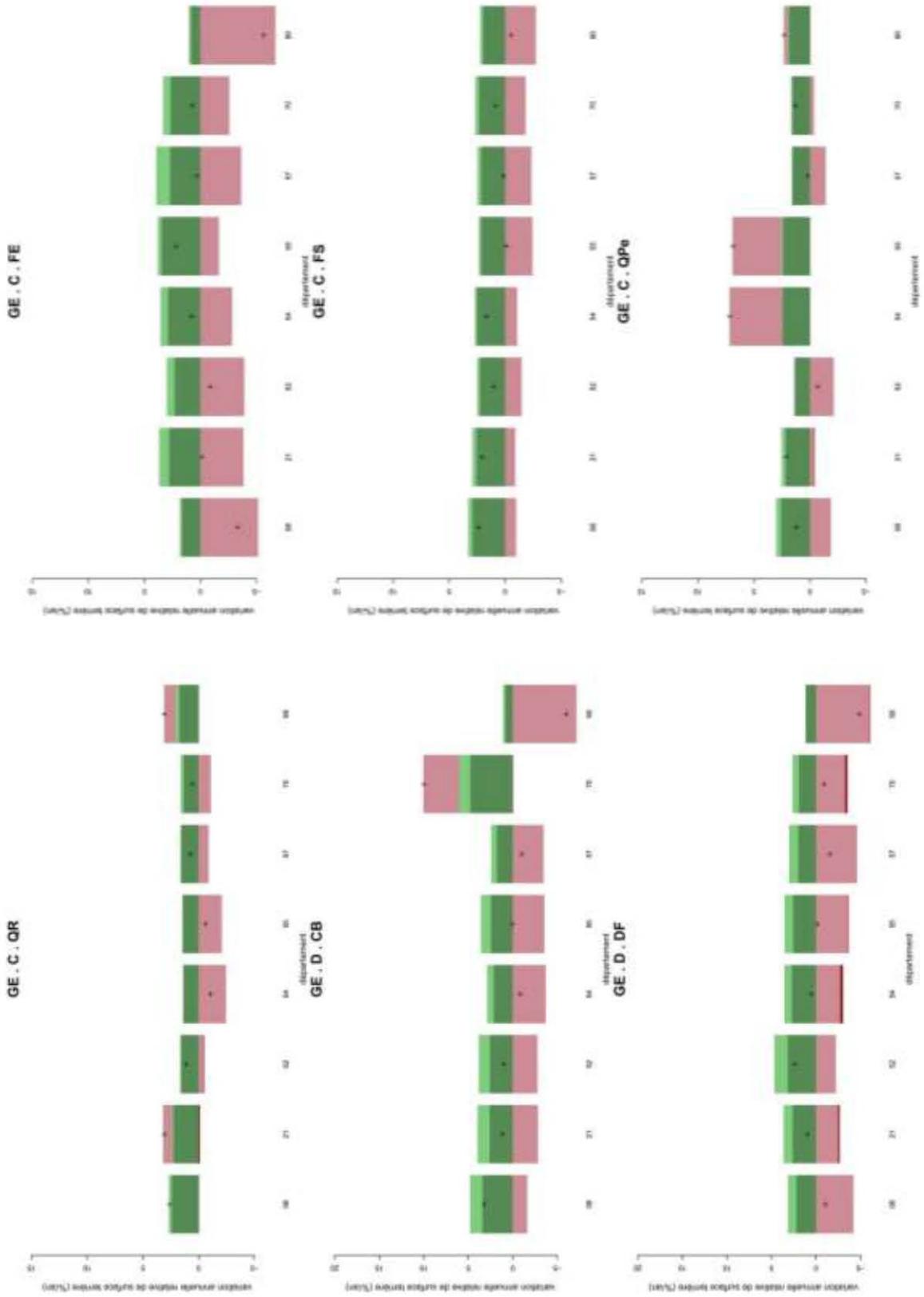


Co . C . pp

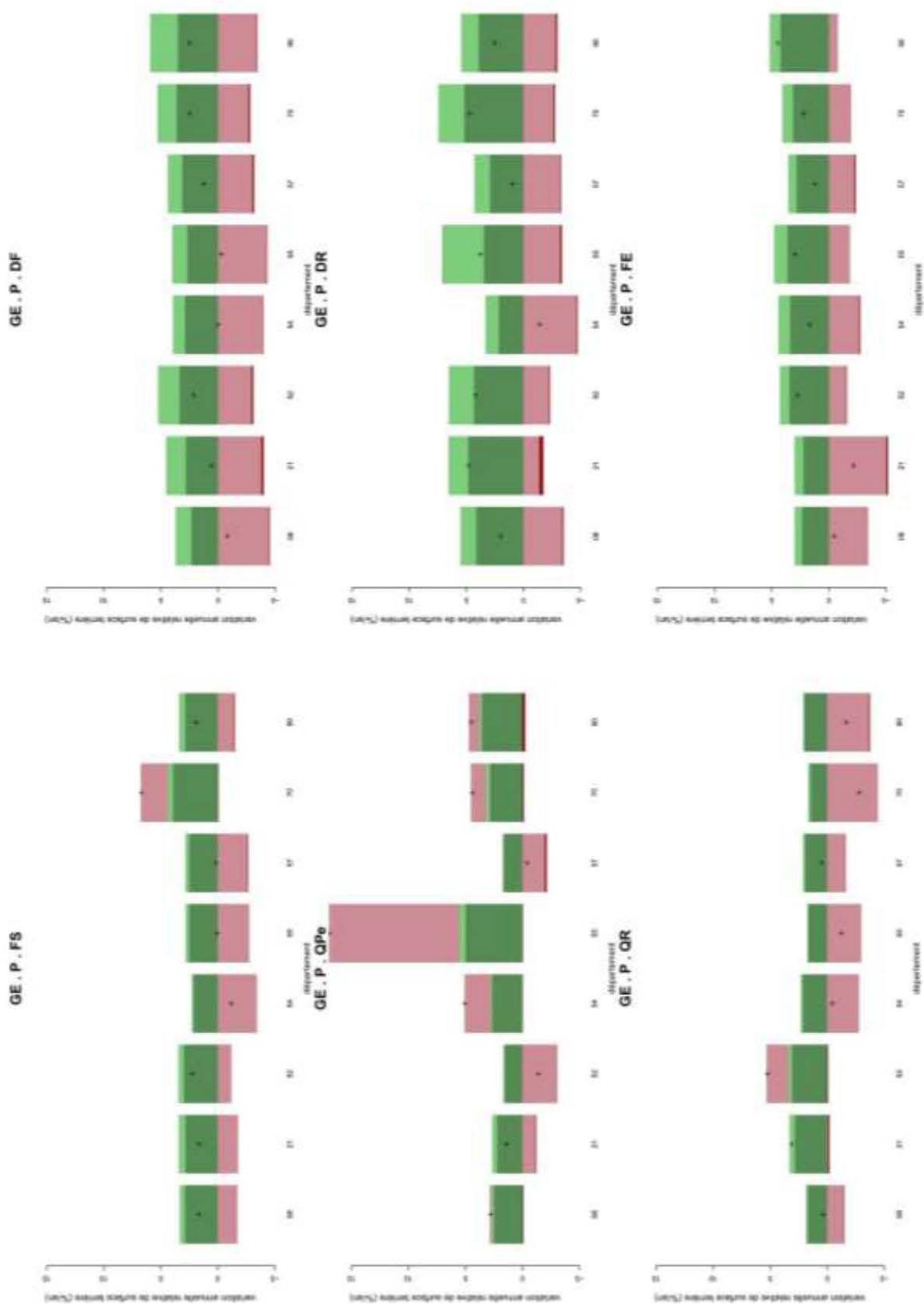


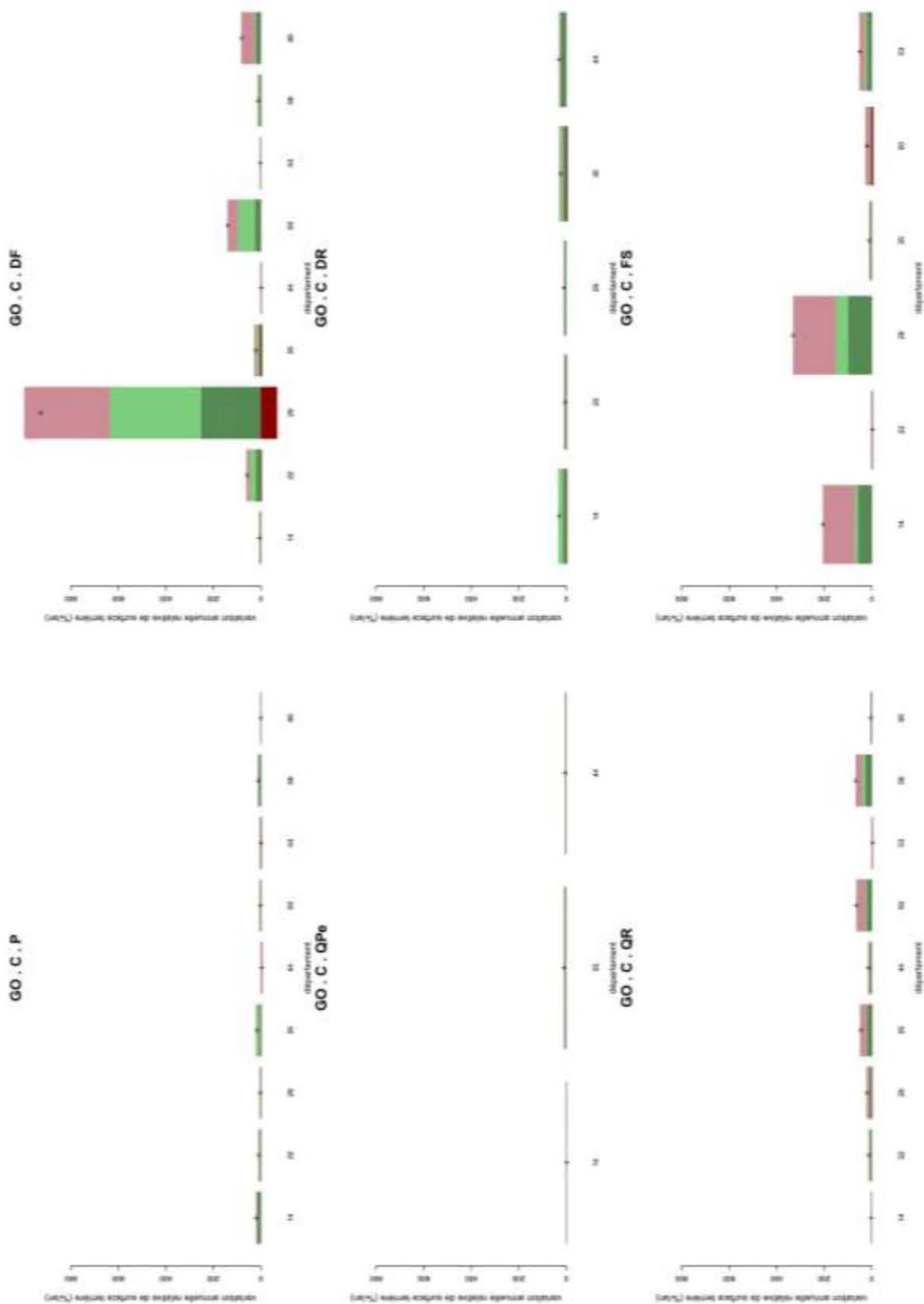












GO . D . DF



GO . D . DR



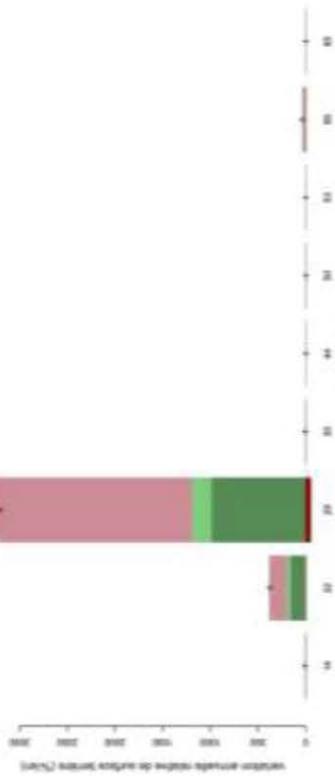
GO . D . FS



GO . D . P



GO . D . QPe



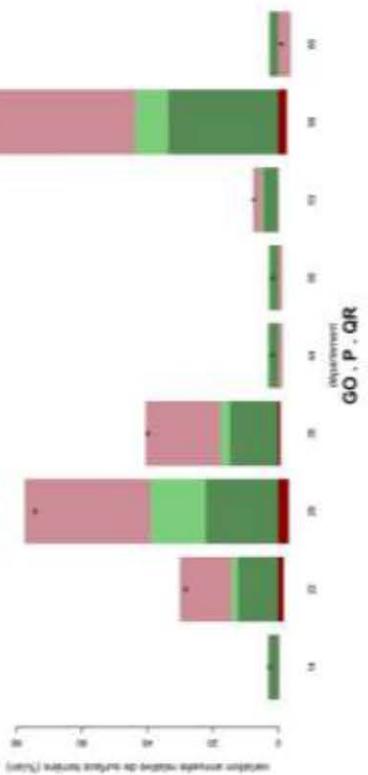
GO . D . QR

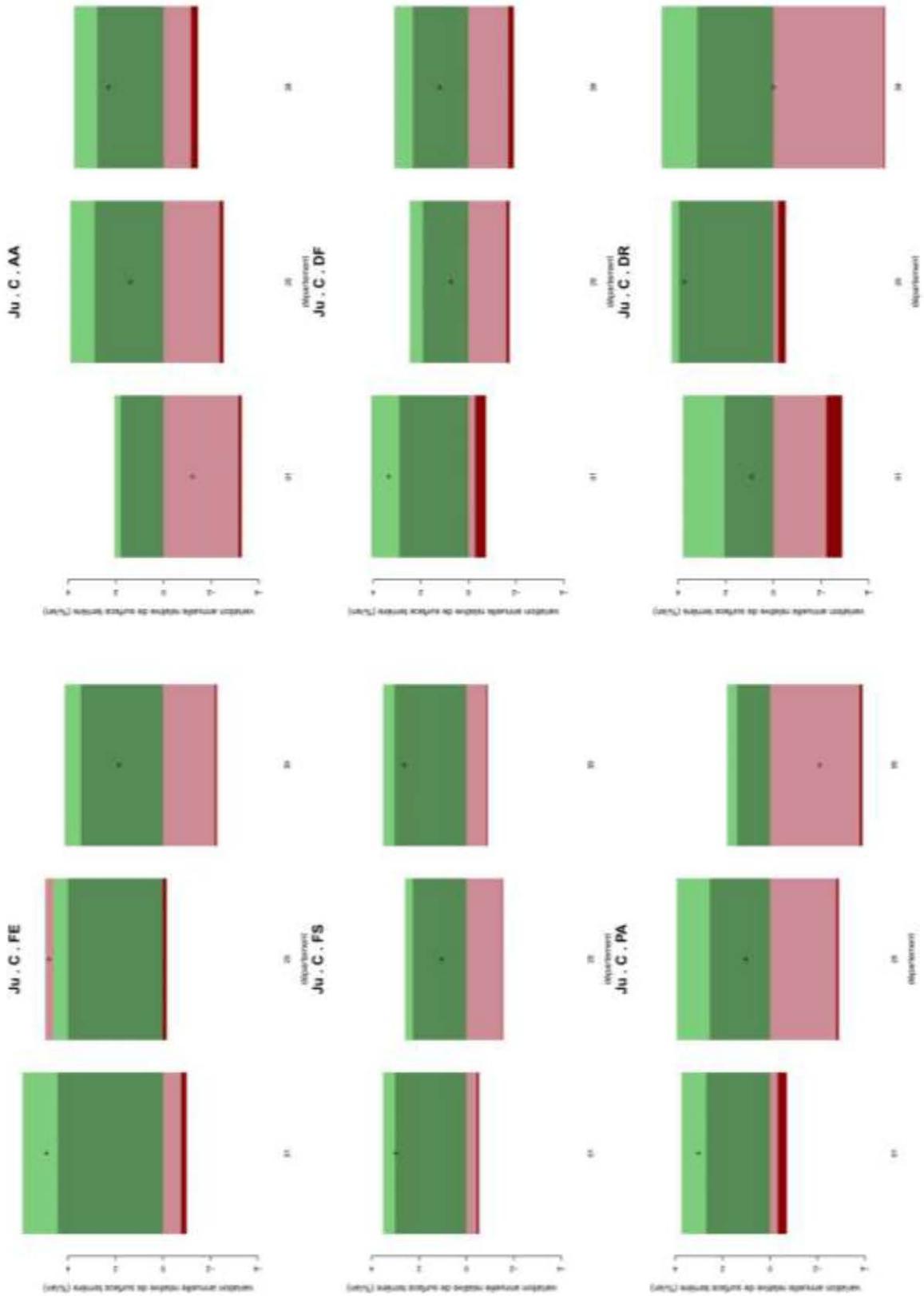


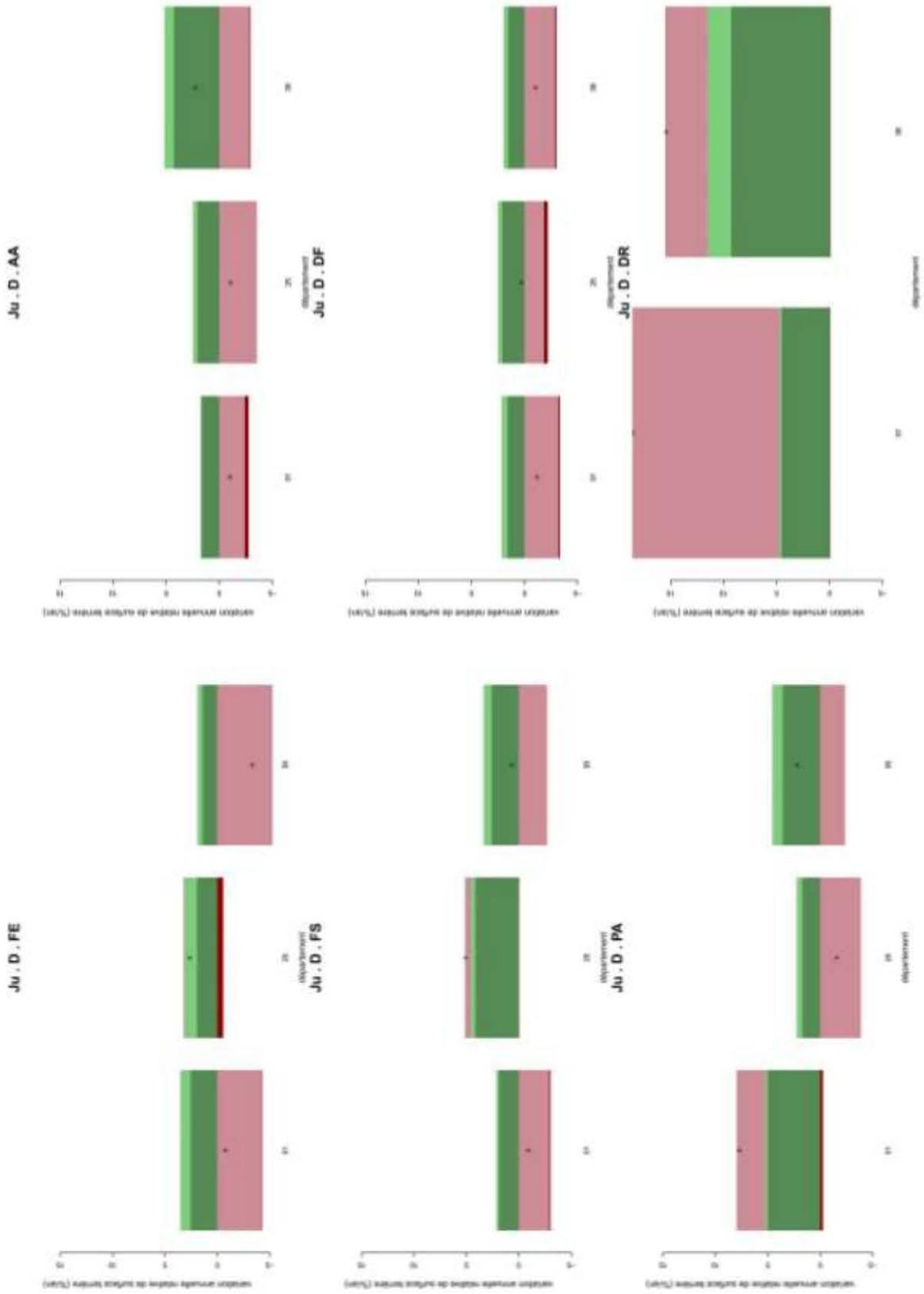
GO . P . DF



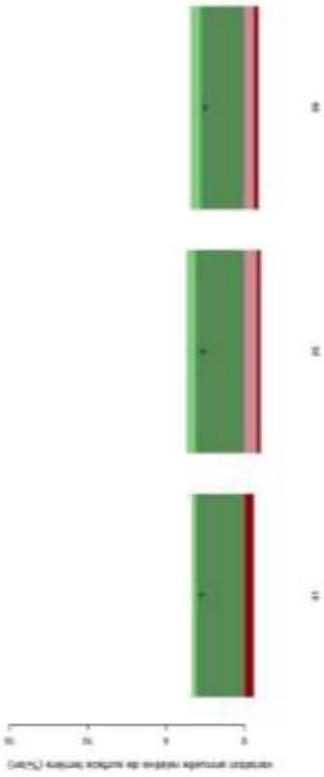
GO . P . P



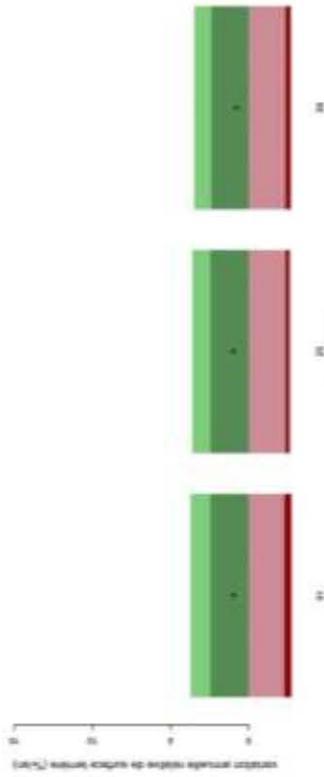




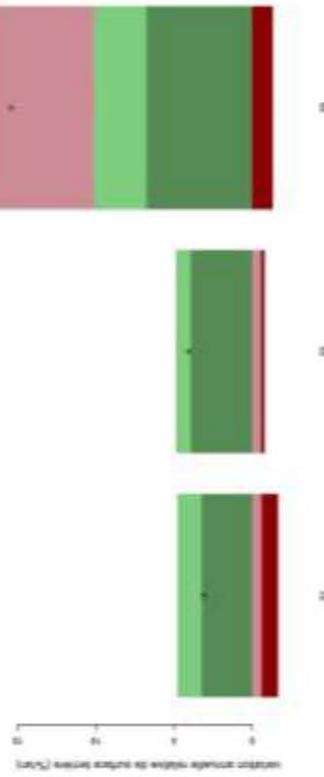
Ju . P . AA



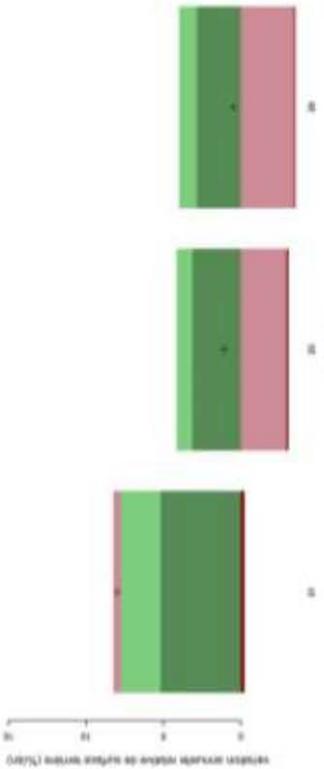
departement
Ju . P . DF



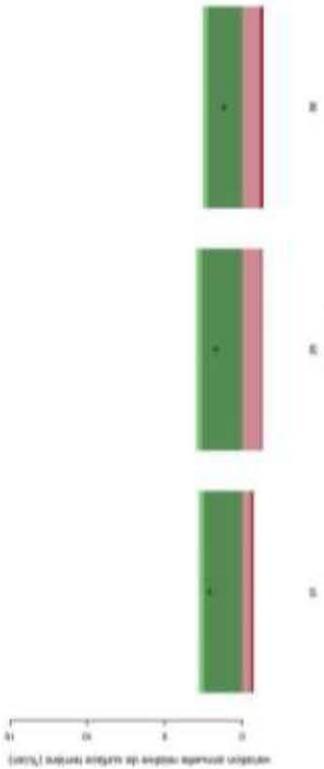
departement
Ju . P . DR



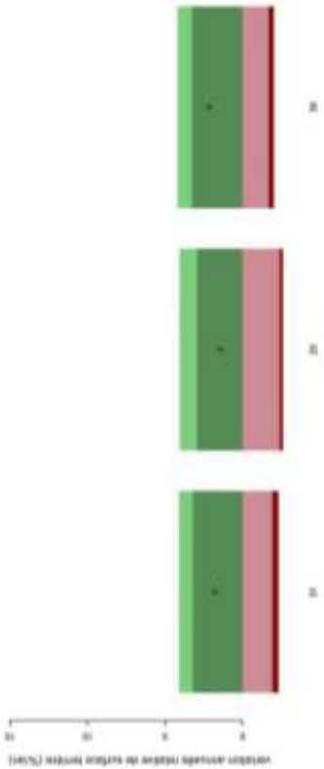
Ju . P . FE

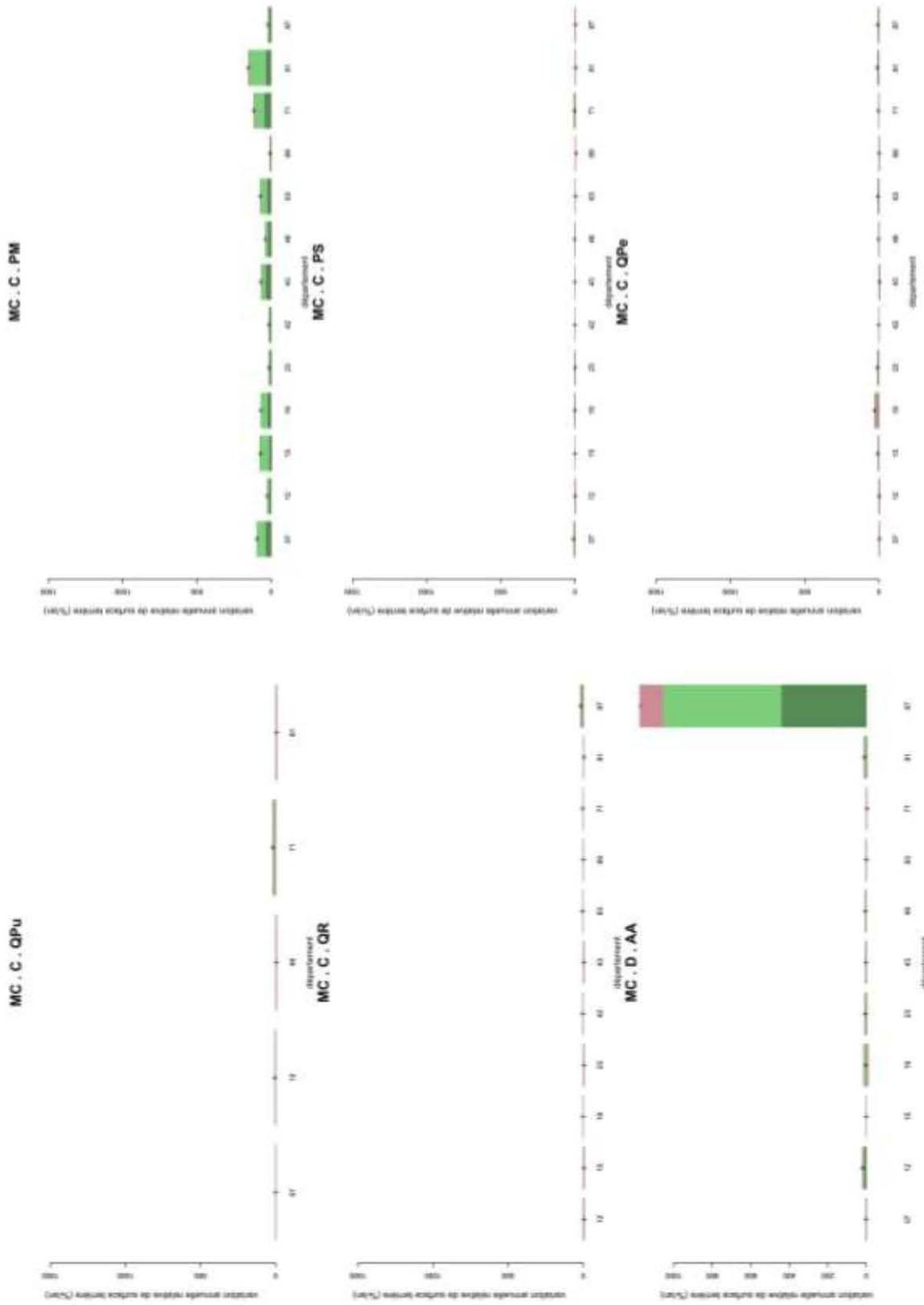


departement
Ju . P . FS

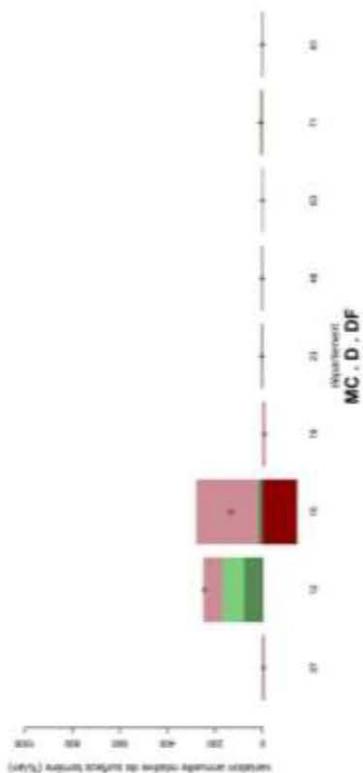


departement
Ju . P . PA





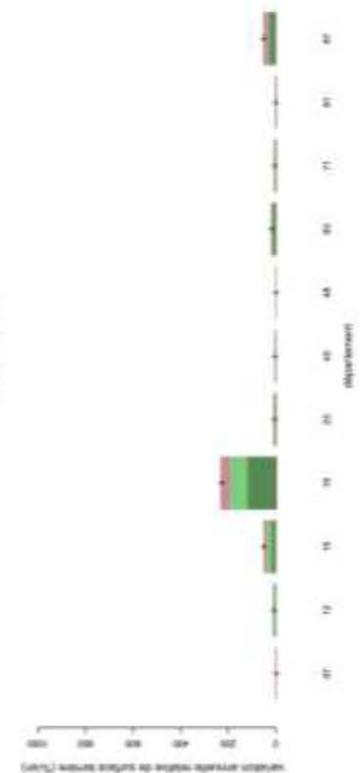
MC . D . CS



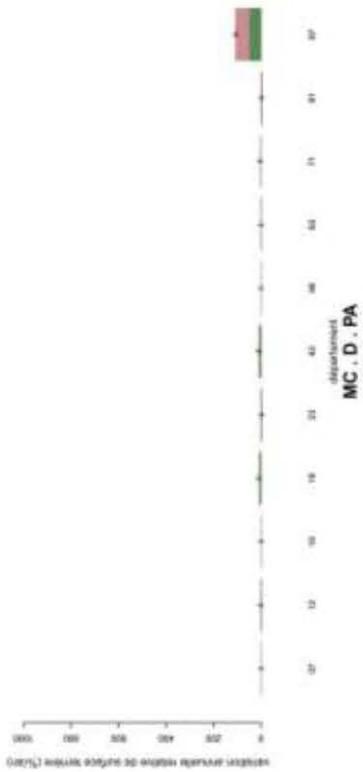
MC . D . DF



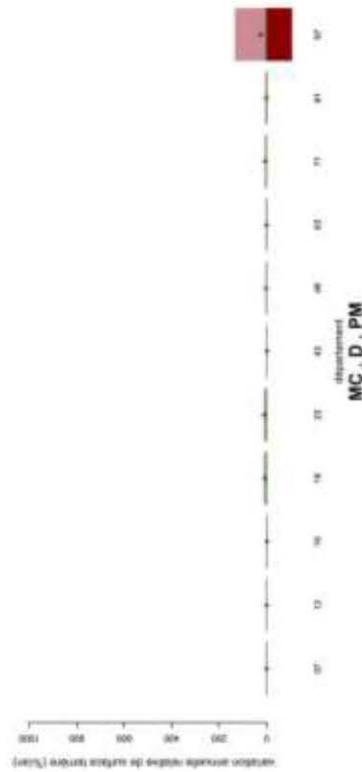
MC . D . DR



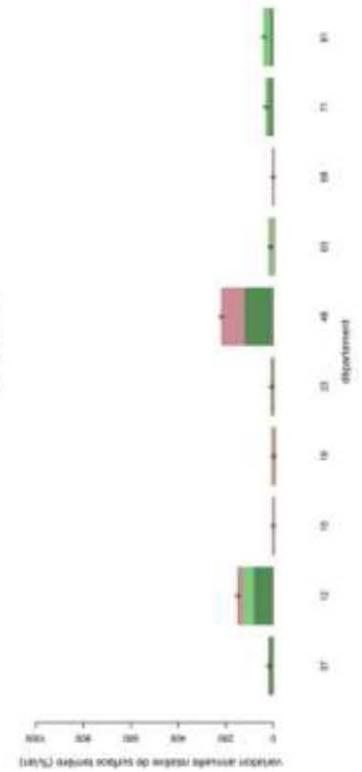
MC . D . FS



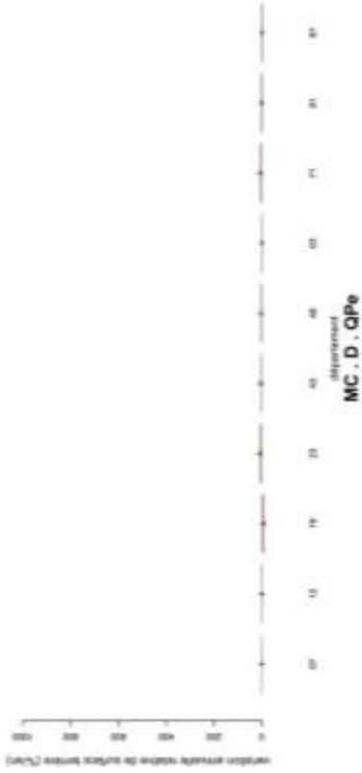
MC . D . PA



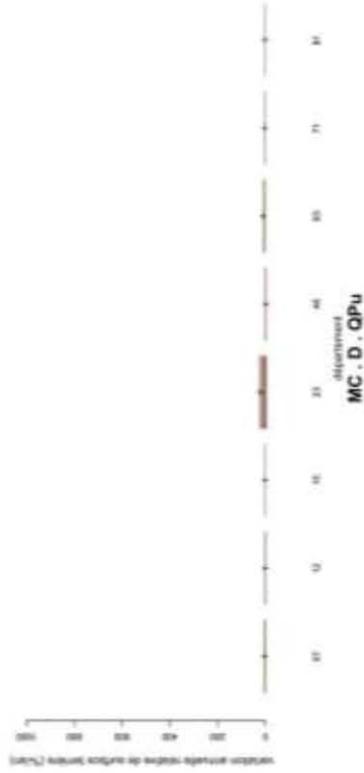
MC . D . PM



MC . D . PS



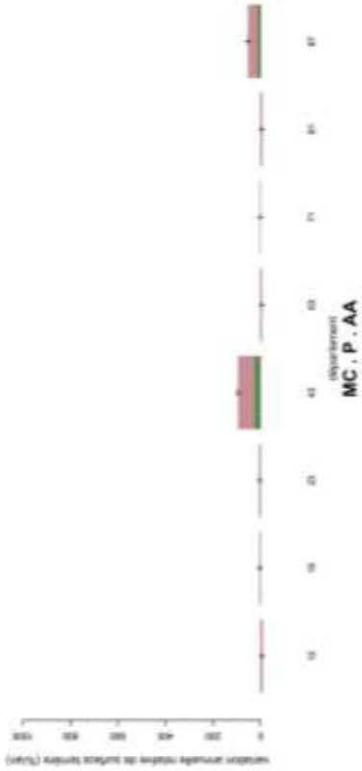
département
MC . D . QPe



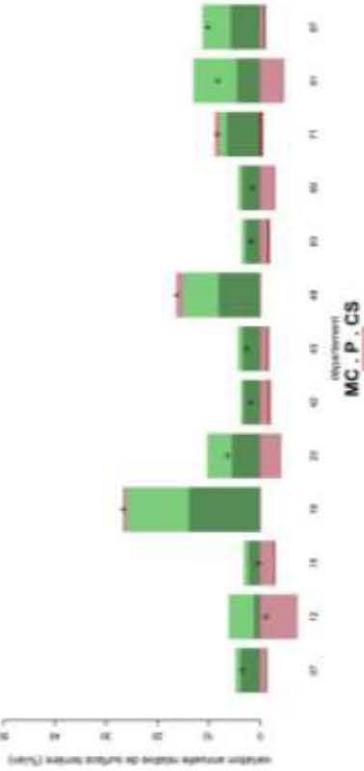
département
MC . D . QPu



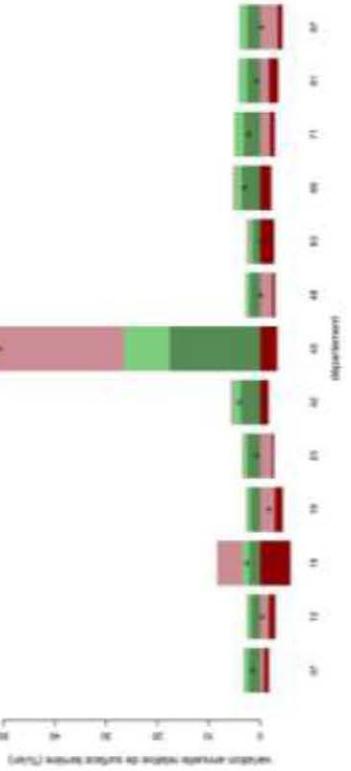
MC . D . QR

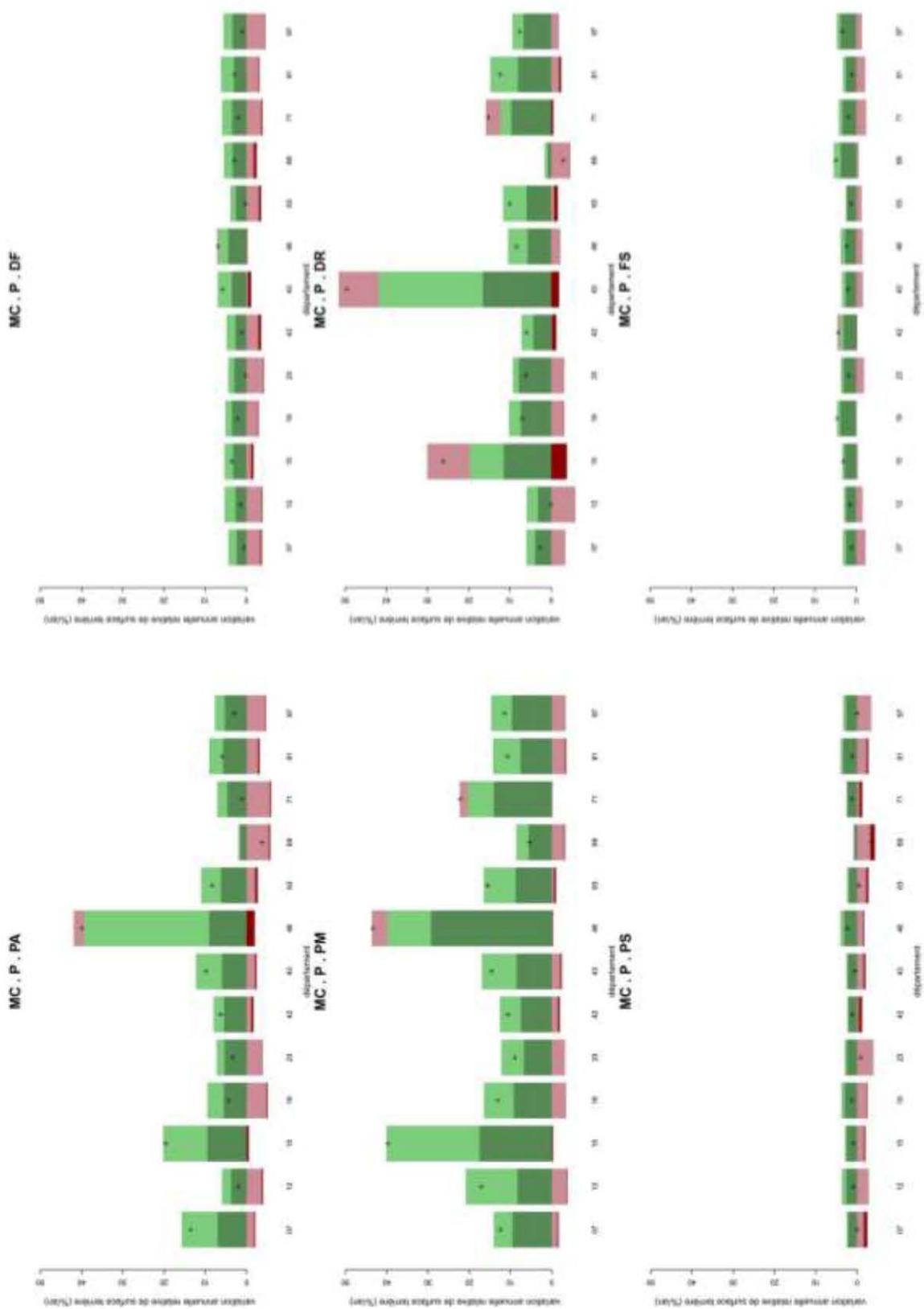


département
MC . P . AA

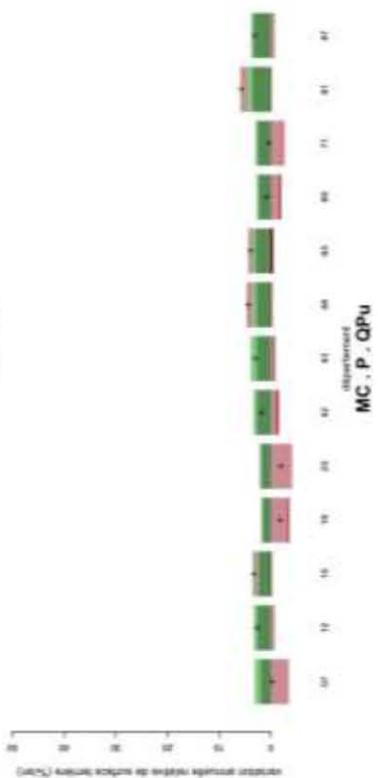


département
MC . P . CS

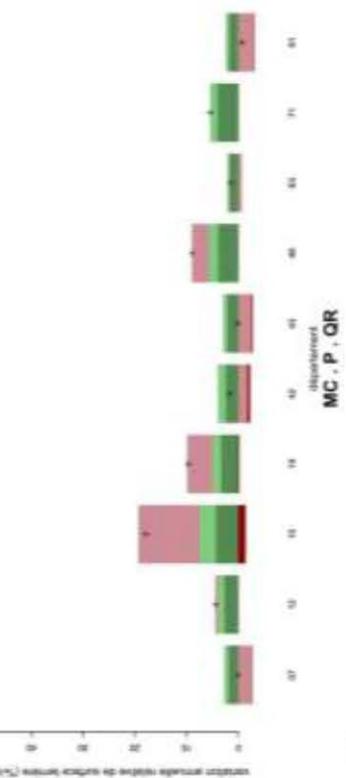




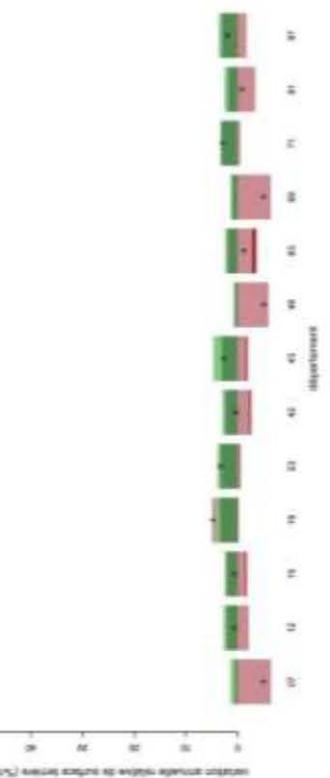
MC . P . QPe



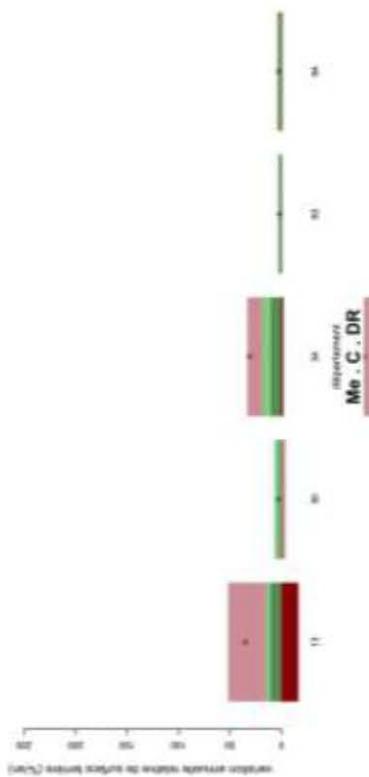
MC . P . QPu



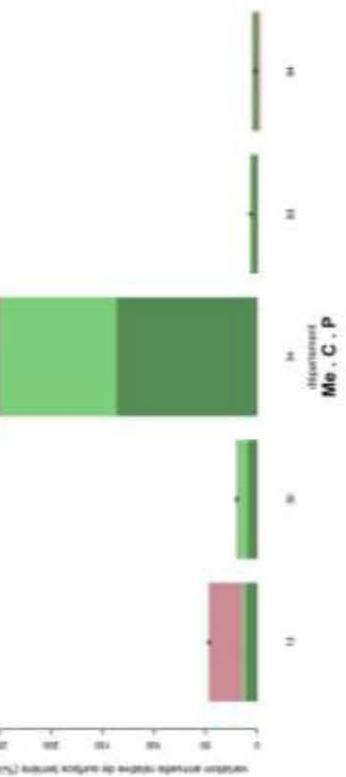
MC . P . QR



Me . C . DF

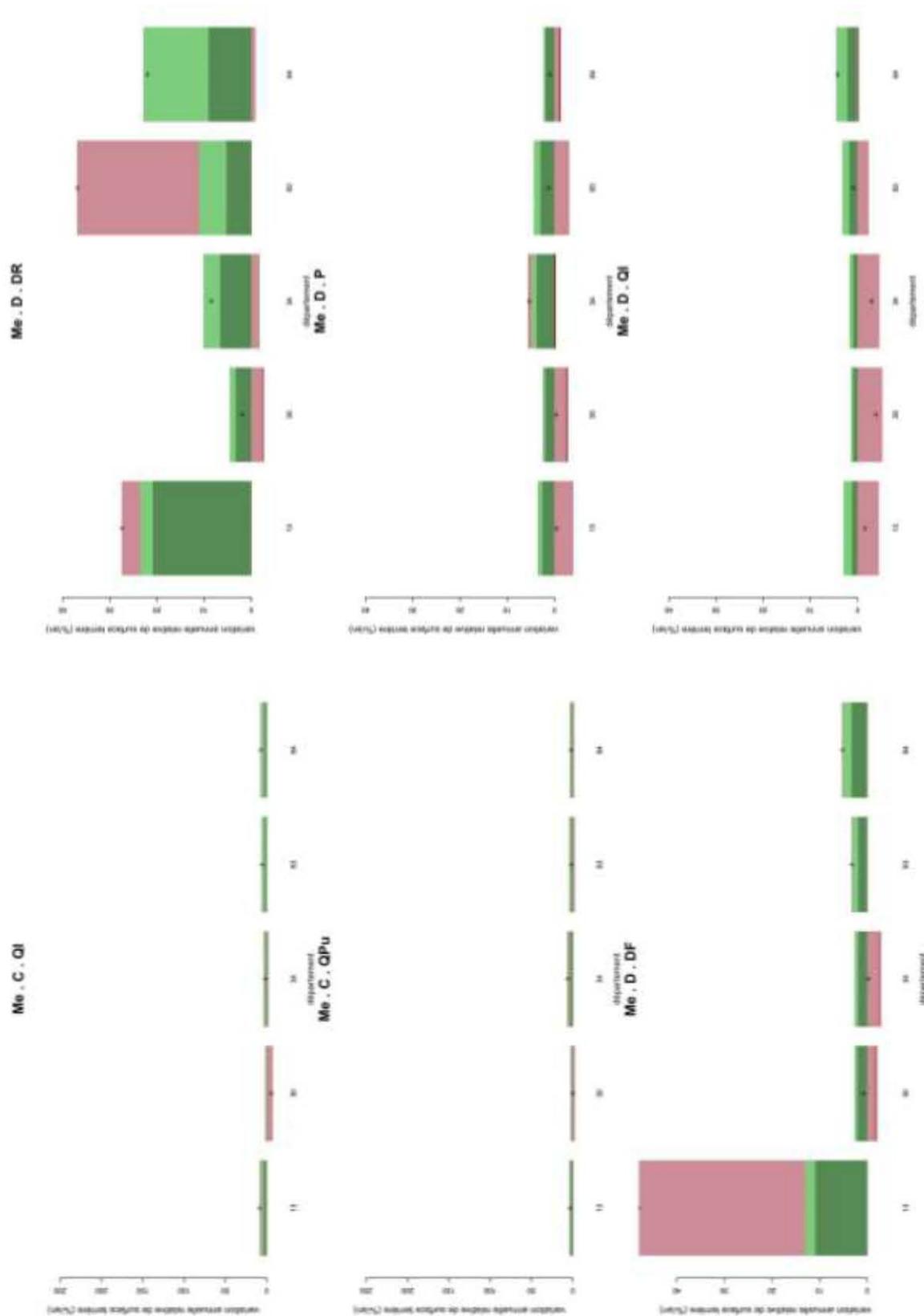


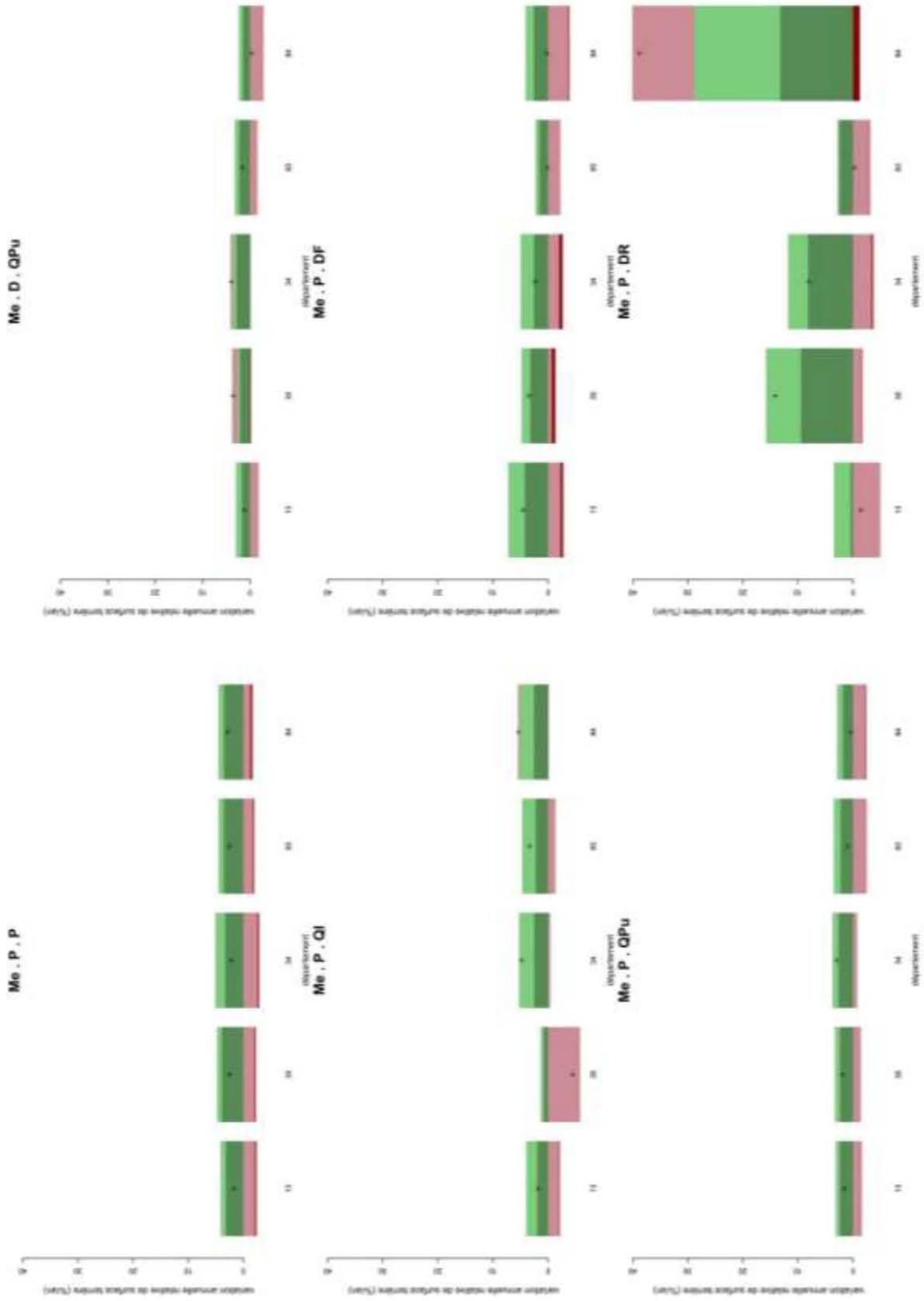
Me . C . DR



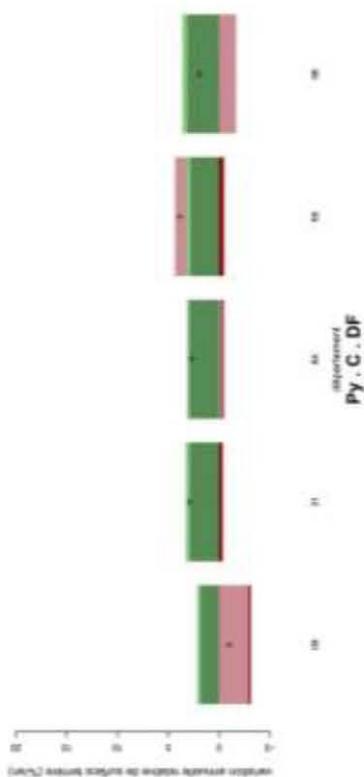
Me . C . P



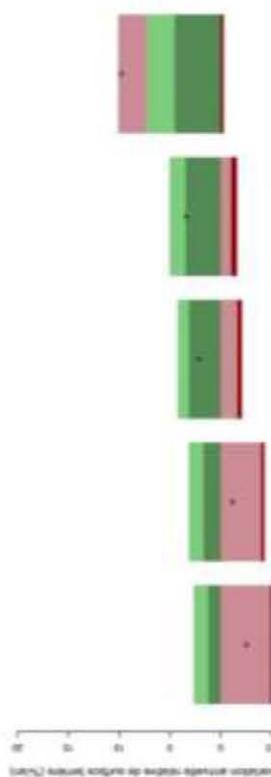




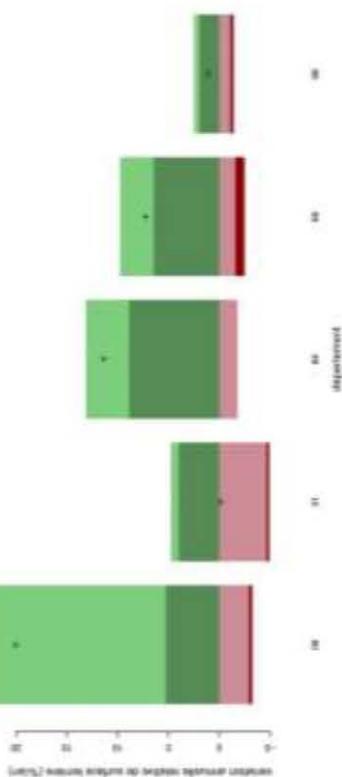
Py . C . AA



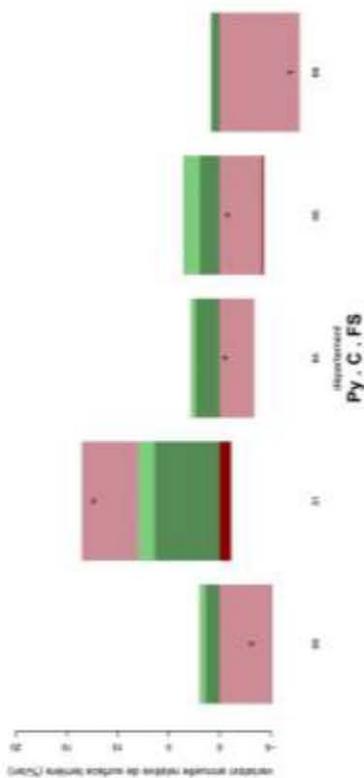
Py . C . DF



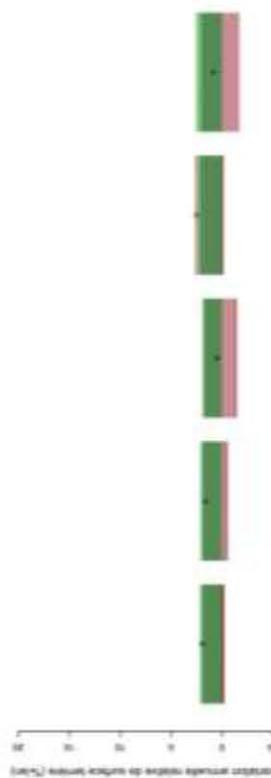
Py . C . DR



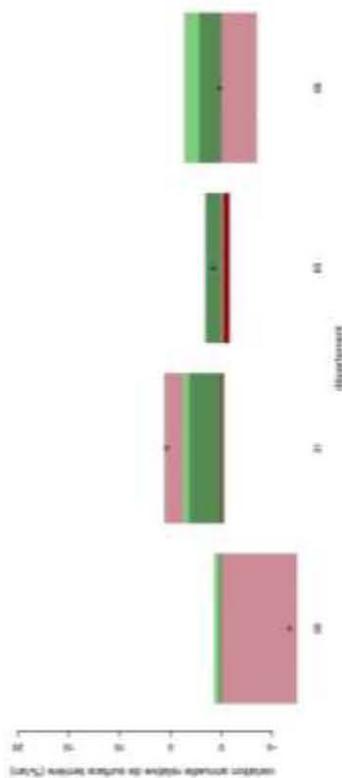
Py . C . FE

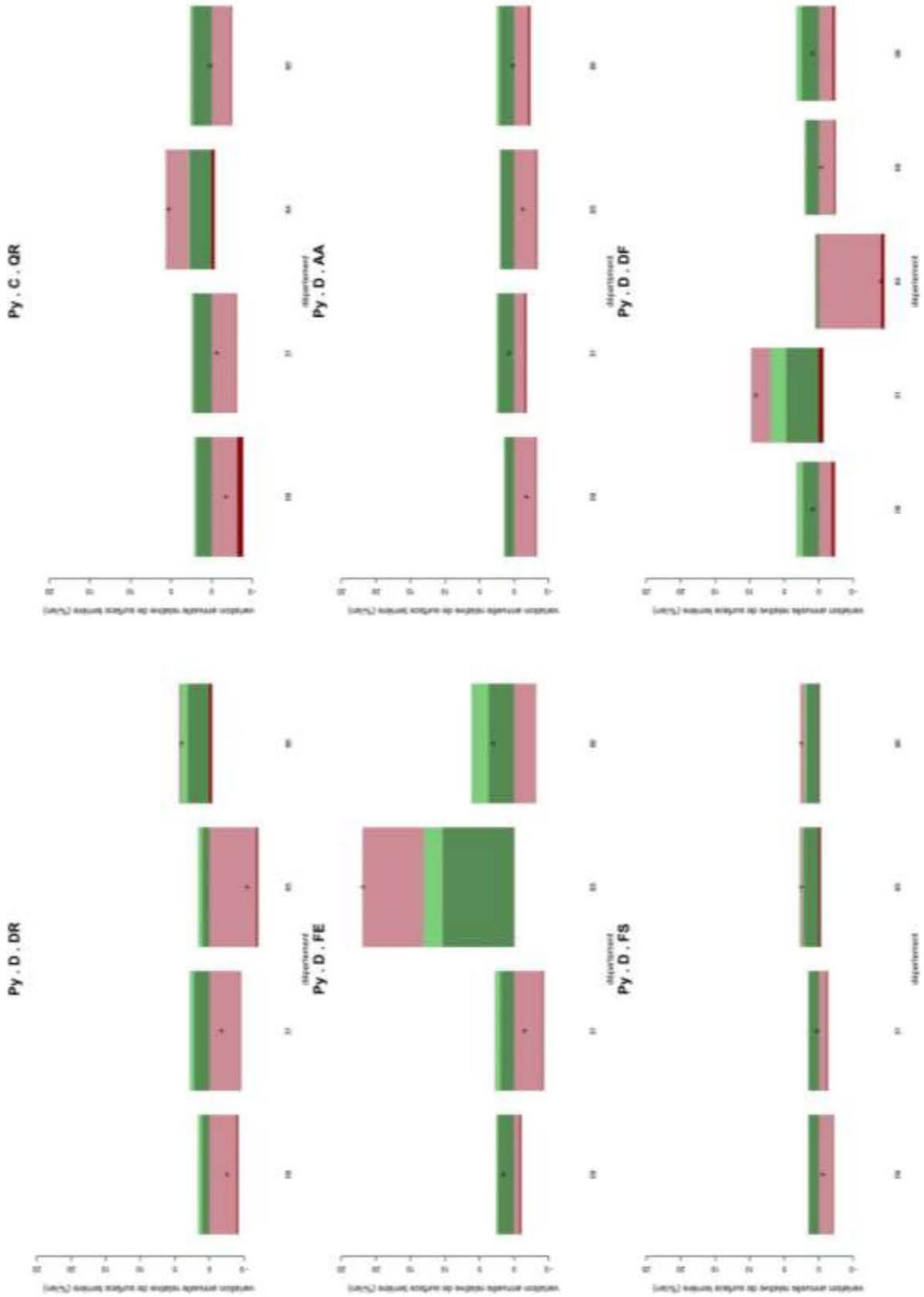


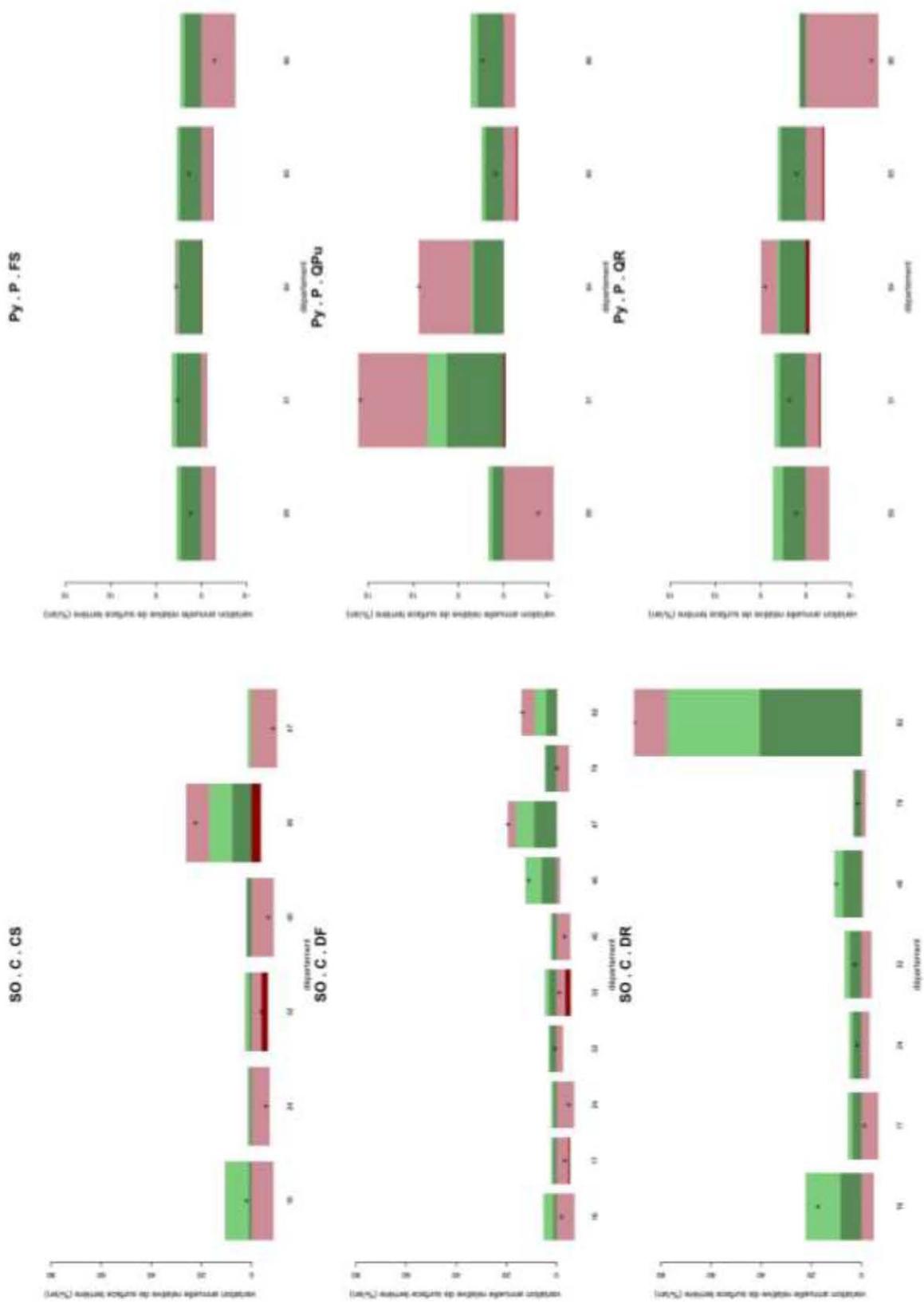
Py . C . FS



Py . C . QPu



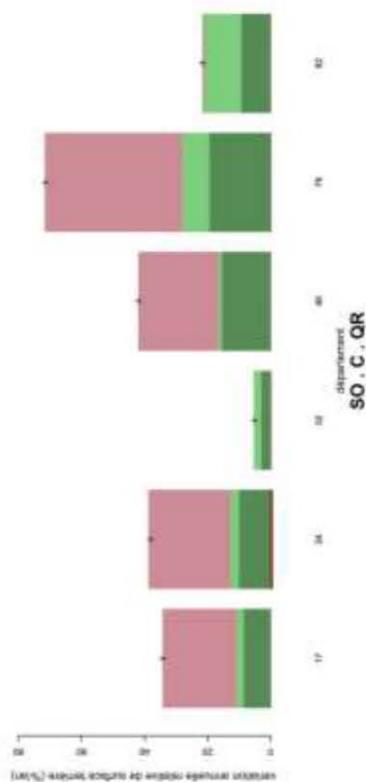




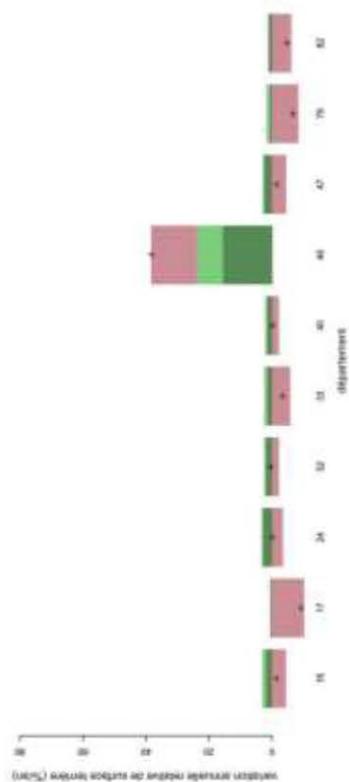
SO . C . PP



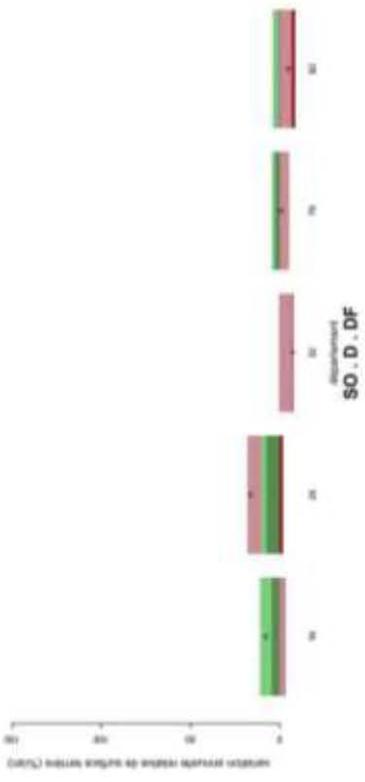
SO . C . QPu



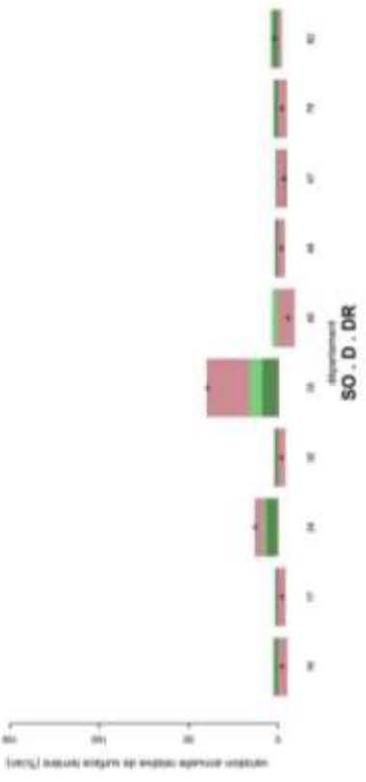
SO . C . QR



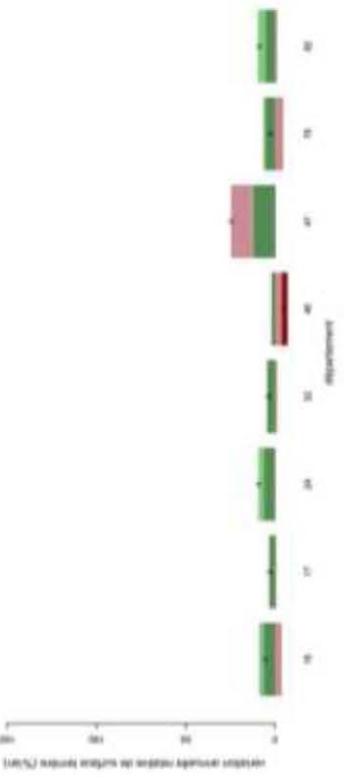
SO . D . CS



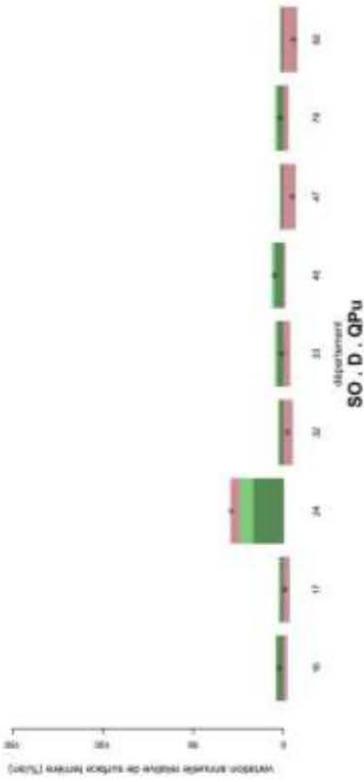
SO . D . DF



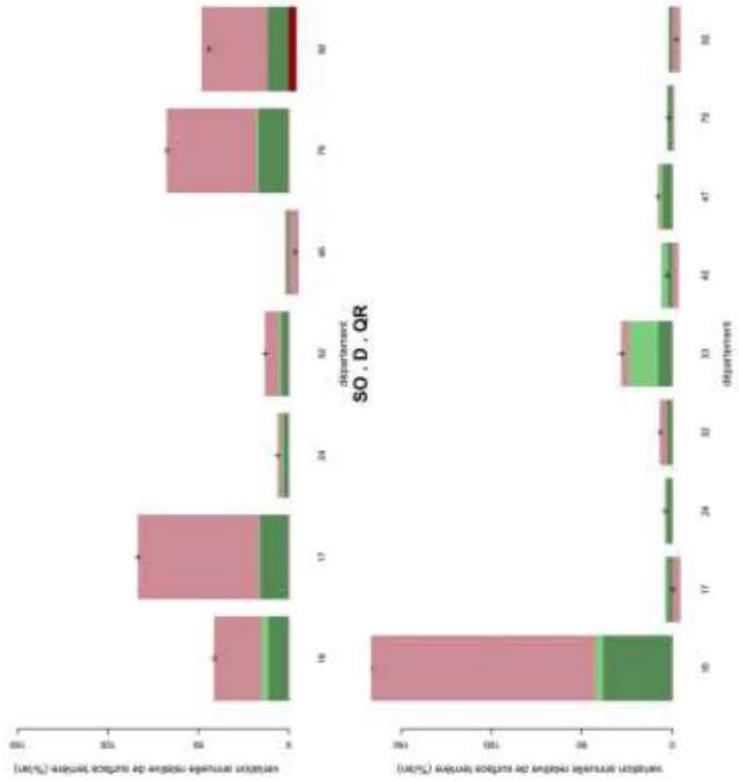
SO . D . DR



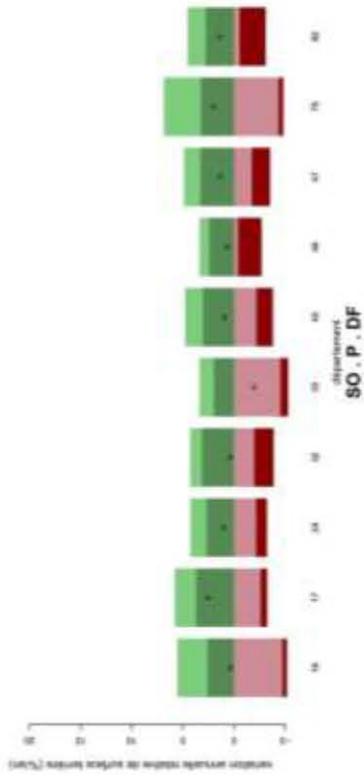
SO . D . PP



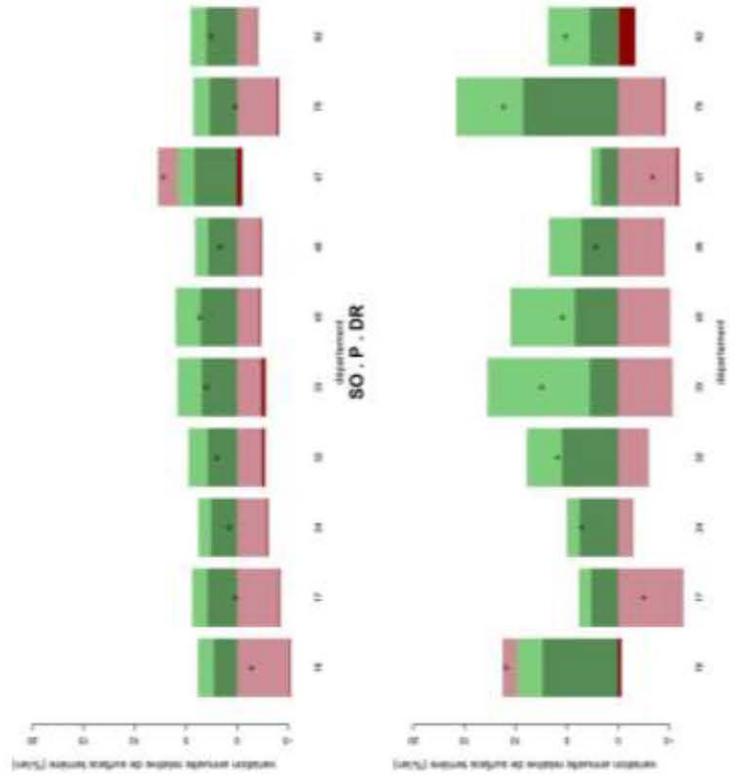
SO . D . QR

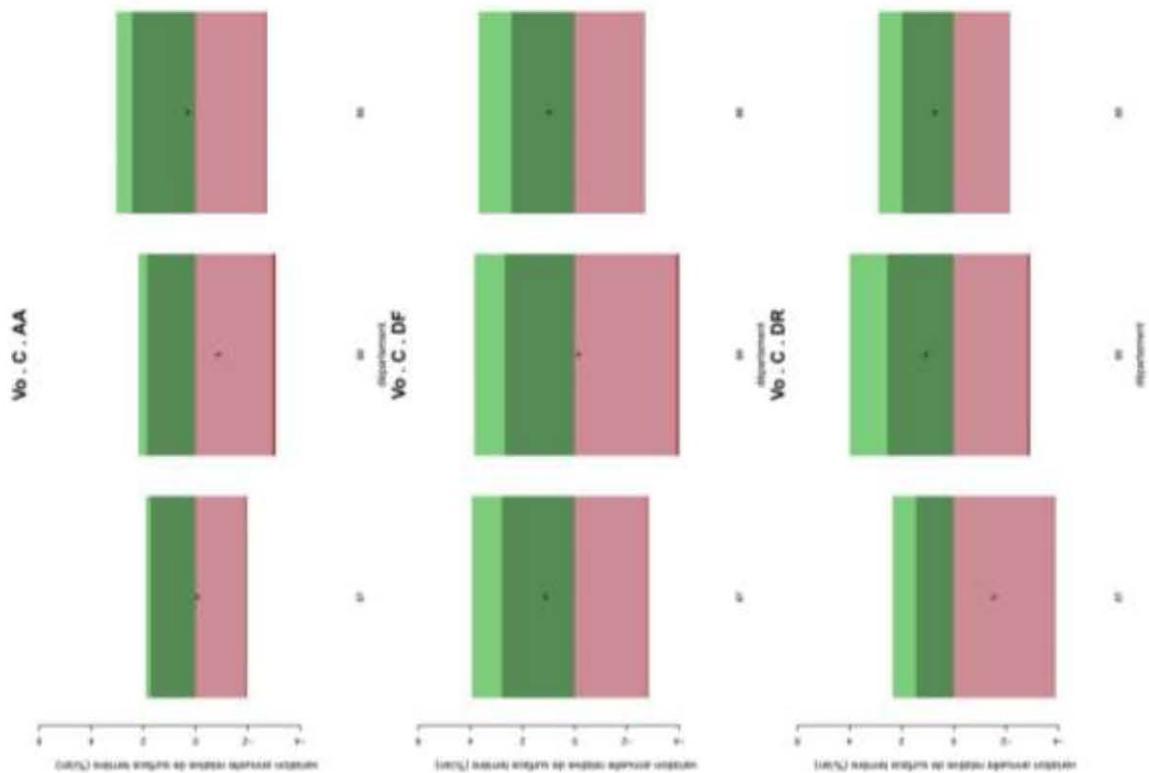
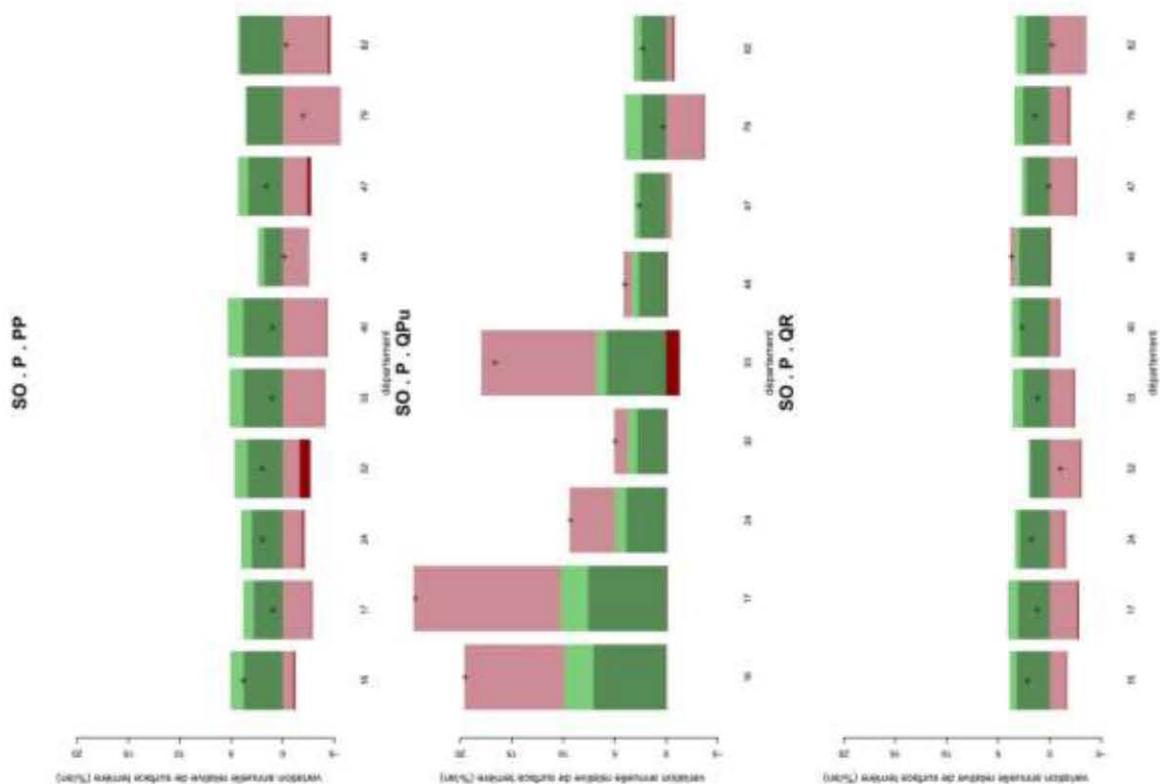


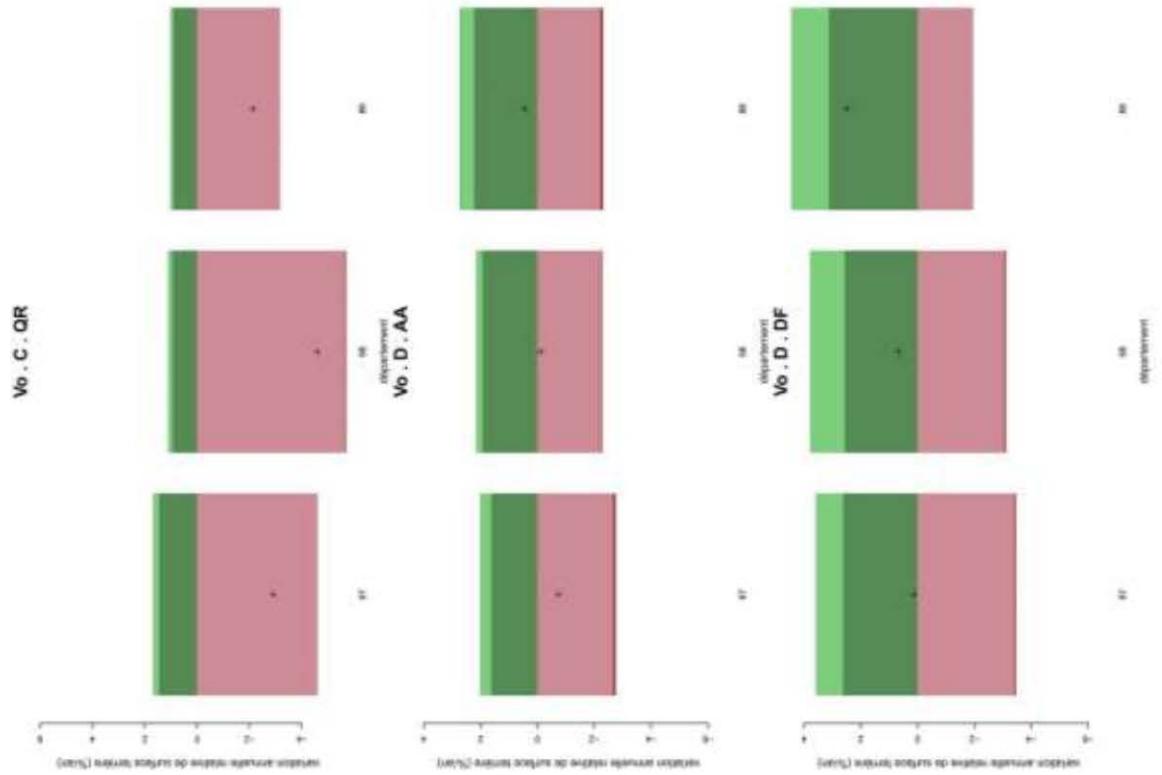
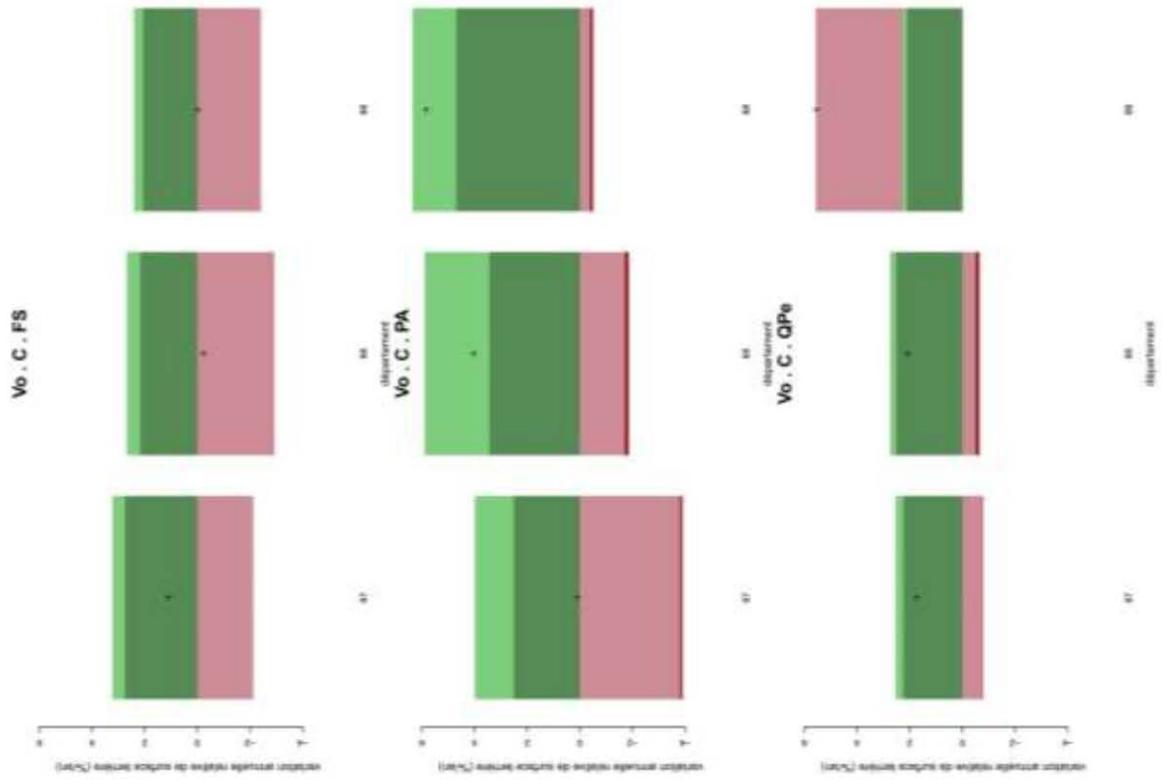
SO . P . CS

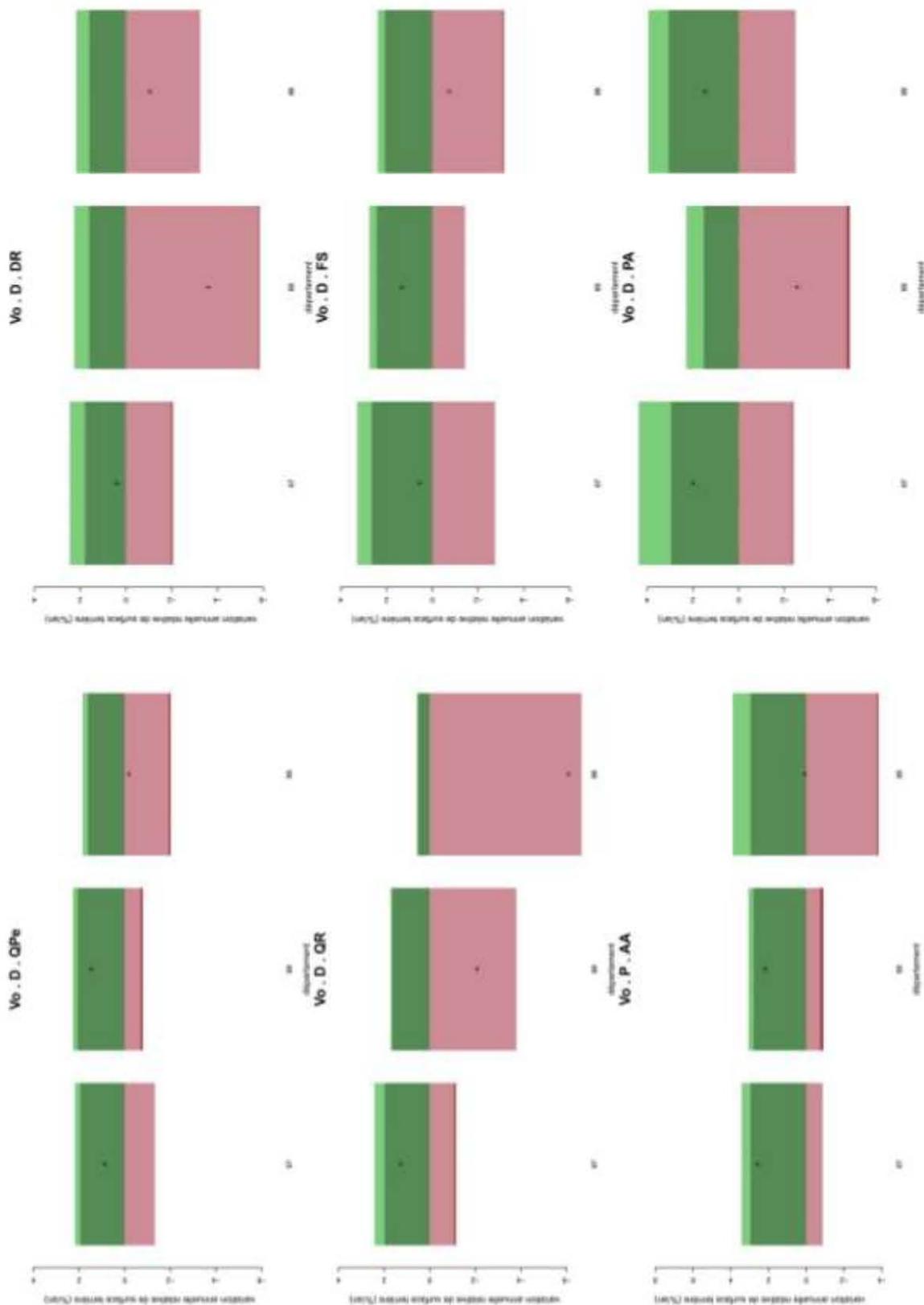


SO . P . DR

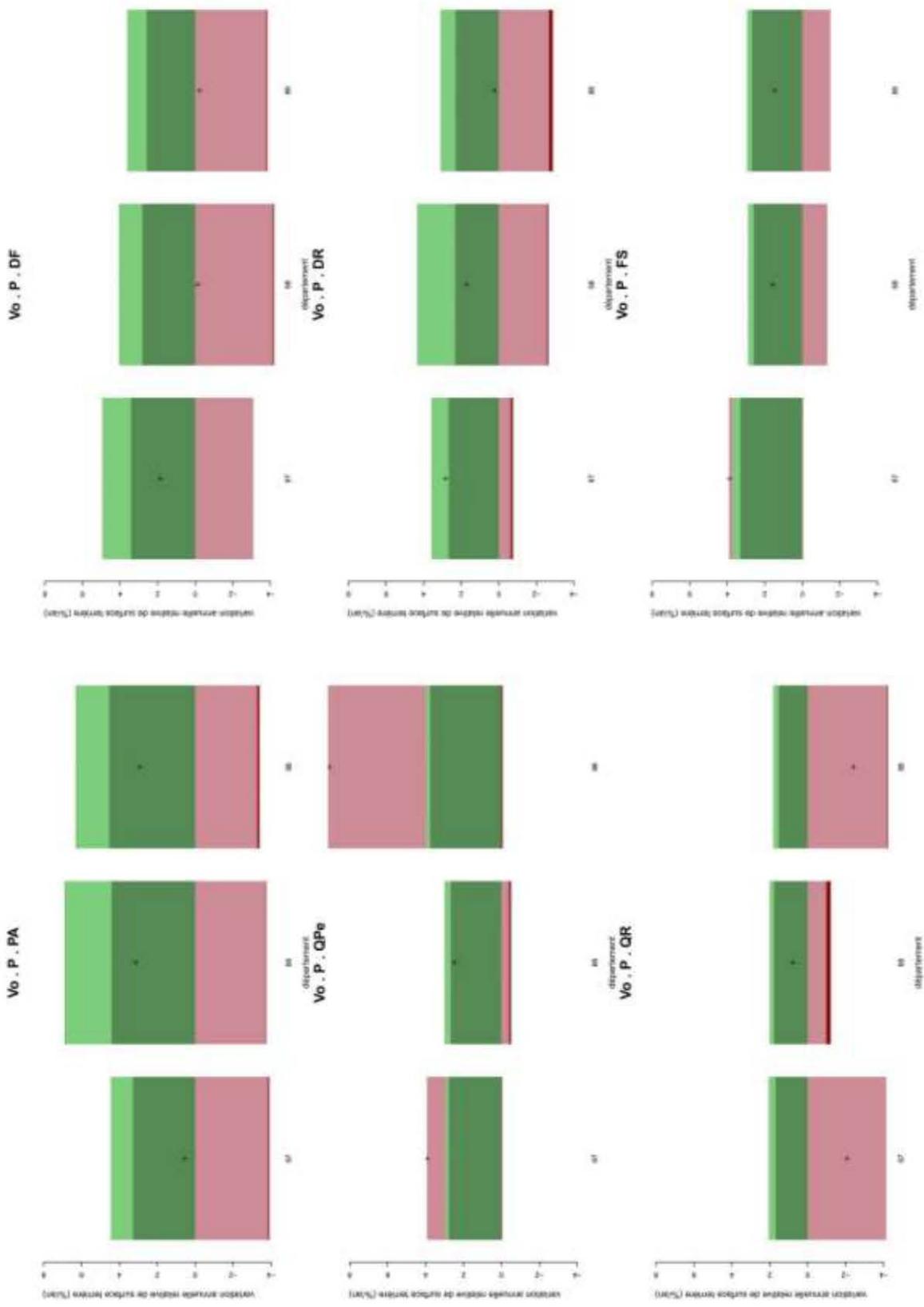








Annexes de la partie IV



Annexe IV.7. Sélection des individus département x propriété

Les individus sont listés par ordre de surface terrière initiale (en moyenne en 1983) décroissante et la part dans la surface terrière initiale cumulée est donnée. En gris : les individus écartés de l'analyse.

Individus Département x propriété	Part dans la surface terrière initiale cumulée (%)	Individus Département x propriété	Part dans la surface terrière initiale cumulée (%)
40 . P	3,85	75 . P	65,18
33 . P	6,94	30 . P	65,80
24 . P	9,55	88 . D	66,41
19 . P	11,38	67 . D	67,02
63 . P	13,06	64 . C	67,63
07 . P	14,56	17 . P	68,24
12 . P	16,05	56 . P	68,84
43 . P	17,43	54 . C	69,44
38 . P	18,79	02 . P	70,03
58 . P	20,10	60 . P	70,61
89 . P	21,41	69 . P	71,18
88 . C	22,68	34 . P	71,73
83 . P	23,91	55 . P	72,29
74 . P	25,08	31 . P	72,84
23 . P	26,22	32 . P	73,38
26 . P	27,36	05 . P	73,91
41 . P	28,47	54 . P	74,43
25 . C	29,56	61 . P	74,94
87 . P	30,65	05 . C	75,45
70 . C	31,71	22 . P	75,93
04 . P	32,77	49 . P	76,39
88 . P	33,79	57 . C	76,85
21 . P	34,81	57 . P	77,31
42 . P	35,83	65 . P	77,76
46 . P	36,83	74 . C	78,21
48 . P	37,84	65 . C	78,65
18 . P	38,81	38 . C	79,09
71 . P	39,76	66 . P	79,52
25 . P	40,69	06 . C	79,95
37 . P	41,62	01 . C	80,37
15 . P	42,55	76 . P	80,79
01 . P	43,47	55 . D	81,21
64 . P	44,36	04 . D	81,59
68 . C	45,23	76 . D	81,98
81 . P	46,08	28 . P	82,36
52 . P	46,93	29 . P	82,73
27 . P	47,78	67 . P	83,09
09 . P	48,61	84 . P	83,44
57 . D	49,44	04 . C	83,78
39 . P	50,26	35 . P	84,12
67 . C	51,06	54 . D	84,44
39 . C	51,84	45 . D	84,75
45 . P	52,62	68 . P	85,07
47 . P	53,38	82 . P	85,38
70 . P	54,13	80 . P	85,68
52 . C	54,87	09 . D	85,99
73 . P	55,61	21 . D	86,30
55 . C	56,34	75 . D	86,60
36 . P	57,07	26 . D	86,89
03 . P	57,79	60 . D	87,18
86 . P	58,51	26 . C	87,46
51 . P	59,23	13 . P	87,74
16 . P	59,93	14 . P	88,01
10 . P	60,61	08 . C	88,28
72 . P	61,28	03 . D	88,55
08 . P	61,95	44 . P	88,82
73 . C	62,62	79 . P	89,08
21 . C	63,28	63 . C	89,33
06 . P	63,93	08 . D	89,58
77 . P	64,57	02 . D	89,82

Annexes de la partie IV

Individus Département x propriété	Part dans la surface terrière initiale cumulée (%)	Individus Département x propriété	Part dans la surface terrière initiale cumulée (%)
52 . D	90,06	79 . D	98,86
89 . C	90,30	18 . C	98,91
77 . D	90,54	12 . C	98,96
53 . P	90,77	43 . D	99,00
48 . D	91,00	44 . D	99,04
61 . D	91,23	85 . D	99,08
31 . C	91,45	07 . C	99,12
68 . D	91,66	80 . D	99,16
10 . C	91,87	29 . D	99,19
09 . C	92,08	01 . D	99,22
39 . D	92,28	74 . D	99,25
30 . D	92,48	19 . C	99,28
62 . P	92,67	02 . C	99,31
05 . D	92,86	23 . D	99,34
58 . C	93,04	77 . C	99,37
58 . D	93,22	73 . D	99,40
66 . D	93,39	16 . D	99,43
66 . C	93,57	23 . C	99,46
59 . D	93,75	63 . D	99,49
85 . P	93,91	14 . D	99,51
41 . D	94,08	49 . D	99,54
40 . C	94,24	34 . C	99,56
71 . C	94,40	37 . C	99,59
38 . D	94,55	17 . C	99,61
34 . D	94,71	69 . C	99,64
15 . C	94,86	27 . C	99,66
50 . P	95,00	15 . D	99,68
51 . D	95,14	90 . D	99,70
83 . C	95,28	32 . C	99,72
33 . D	95,41	76 . C	99,74
59 . P	95,54	75 . C	99,76
18 . D	95,67	56 . D	99,78
72 . D	95,80	87 . C	99,79
71 . D	95,92	32 . D	99,80
40 . D	96,04	59 . C	99,82
89 . D	96,16	22 . D	99,83
27 . D	96,28	47 . D	99,84
51 . C	96,40	61 . C	99,86
90 . C	96,51	36 . C	99,87
07 . D	96,63	03 . C	99,88
10 . D	96,74	82 . D	99,89
31 . D	96,85	62 . C	99,90
36 . D	96,95	24 . D	99,91
43 . C	97,06	47 . C	99,91
81 . D	97,17	53 . D	99,92
84 . C	97,27	22 . C	99,93
90 . P	97,38	13 . D	99,93
83 . D	97,48	86 . C	99,94
48 . C	97,58	50 . D	99,94
28 . D	97,66	19 . D	99,95
81 . C	97,75	72 . C	99,95
37 . D	97,83	50 . C	99,96
33 . C	97,91	24 . C	99,96
25 . D	97,99	16 . C	99,96
35 . D	98,07	14 . C	99,97
17 . D	98,14	46 . C	99,97
70 . D	98,21	64 . D	99,98
06 . D	98,28	29 . C	99,98
30 . C	98,35	49 . C	99,98
42 . C	98,42	45 . C	99,98
13 . C	98,48	35 . C	99,99
12 . D	98,54	56 . C	99,99
86 . D	98,60	53 . C	99,99
65 . D	98,65	80 . C	99,99
62 . D	98,71	41 . C	99,99
60 . C	98,76	44 . C	100,00
84 . D	98,81	79 . C	100,00

Annexe IV.7

Individus Département x propriété	Part dans la surface terrière initiale cumulée (%)
85 . C	100,00
46 . D	100,00
82 . C	100,00
69 . D	100,00
87 . D	100,00
28 . C	100,00

Tableau A.IV.7.1 Part cumulée de la surface terrière initiale représentée par les individus département x propriété. En gris : les individus écartés de l'analyse

Annexe IV.8. Sélection des individus département x propriété x essence

Les individus sont listés par ordre de surface terrière initiale (en moyenne en 1983) décroissante et la part dans la surface terrière initiale cumulée est donnée. En gris : les individus écartés de l'analyse.

Individus département x propriété x essence	Part dans la surface terrière initiale cumulée (%)	propriété x essence	initiale cumulée (%)
40 . P . PP	3,47	04 . P . QPu	29,77
33 . P . PP	6,03	83 . P . DF	30,06
43 . P . PS	6,82	63 . P . AA	30,34
38 . P . DF	7,58	06 . P . PS	30,61
24 . P . CS	8,30	71 . P . DF	30,89
24 . P . DF	8,90	37 . P . P	31,16
01 . P . DF	9,45	02 . P . DF	31,44
48 . P . PS	9,98	25 . C . AA	31,71
24 . P . PP	10,51	86 . P . QR	31,98
83 . P . P	11,03	23 . P . DF	32,24
74 . P . PA	11,55	74 . C . PA	32,51
46 . P . QPu	12,05	36 . P . QR	32,77
24 . P . QR	12,54	77 . P . DF	33,04
89 . P . QPe	13,02	89 . P . DF	33,30
04 . P . PS	13,48	70 . C . FS	33,56
58 . P . QPe	13,93	63 . P . DF	33,82
64 . C . FS	14,36	33 . P . DF	34,07
19 . P . QR	14,78	12 . P . QR	34,33
12 . P . CS	15,19	60 . P . DF	34,59
25 . C . DF	15,59	68 . C . AA	34,84
19 . P . CS	15,99	12 . P . QPu	35,10
87 . P . QR	16,38	27 . P . QPe	35,35
63 . P . PS	16,77	26 . P . DF	35,60
74 . P . DF	17,16	41 . P . DF	35,85
88 . P . PA	17,55	88 . P . DF	36,09
64 . P . DF	17,93	76 . D . FS	36,34
39 . C . DF	18,31	72 . P . P	36,58
47 . P . PP	18,69	37 . P . QPe	36,83
07 . P . PS	19,05	05 . P . PS	37,07
70 . C . QPe	19,42	42 . P . AA	37,31
09 . P . DF	19,78	25 . C . FS	37,55
73 . P . DF	20,13	66 . P . DF	37,78
88 . C . AA	20,49	21 . P . QPe	38,02
41 . P . P	20,84	27 . P . DF	38,25
87 . P . CS	21,19	24 . P . QPu	38,48
33 . P . QR	21,54	63 . P . FS	38,72
41 . P . QR	21,88	30 . P . DF	38,94
26 . P . PS	22,22	18 . P . DF	39,17
07 . P . CS	22,56	16 . P . DF	39,40
64 . P . QR	22,90	15 . P . FS	39,62
73 . C . PA	23,24	37 . P . DF	39,85
57 . D . DR	23,57	21 . C . QPe	40,07
39 . P . DF	23,91	21 . P . DR	40,29
23 . P . QR	24,24	57 . D . FS	40,51
56 . P . P	24,57	73 . P . PA	40,73
71 . P . QPe	24,89	38 . P . PA	40,95
25 . P . PA	25,21	68 . C . FS	41,17
19 . P . PS	25,54	39 . P . PA	41,39
31 . P . DF	25,86	03 . P . QR	41,61
26 . P . QPu	26,18	36 . P . QPe	41,82
19 . P . DF	26,49	18 . P . QPe	42,04
45 . P . QR	26,80	63 . P . QR	42,25
83 . P . QPu	27,11	40 . P . DF	42,47
88 . C . FS	27,42	21 . P . DF	42,68
42 . P . PS	27,73	07 . P . QPu	42,89
43 . P . AA	28,03	15 . P . QR	43,10
88 . D . AA	28,33	51 . P . DF	43,31
25 . P . DF	28,62	74 . P . FS	43,51
18 . P . QR	28,91	34 . P . DF	43,71
40 . P . QR	29,20	72 . P . DF	43,91
75 . P . DF	29,49	13 . P . P	44,10
Individus département x	Part dans la surface terrière	Individus département x	Part dans la surface terrière
		propriété x essence	initiale cumulée

Annexe IV.8

	(%)		(%)
65 . P . DF	44,30	19 . P . PA	56,21
08 . P . DF	44,50	39 . P . FS	56,36
54 . P . DR	44,69	12 . P . QPe	56,51
58 . P . DF	44,89	38 . P . FS	56,67
32 . P . DF	45,08	52 . P . CB	56,82
16 . P . QR	45,27	49 . P . DF	56,97
03 . D . QPe	45,47	64 . P . FS	57,12
45 . P . DF	45,66	07 . P . DF	57,27
58 . P . QR	45,85	86 . P . P	57,42
37 . P . QR	46,04	41 . P . QPe	57,57
70 . P . DF	46,23	84 . P . P	57,72
25 . P . AA	46,42	66 . C . DR	57,86
17 . P . DF	46,61	39 . C . AA	58,01
55 . C . QR	46,79	49 . P . P	58,16
55 . C . FS	46,98	70 . C . QR	58,31
58 . P . CB	47,17	72 . P . QPe	58,45
10 . P . QR	47,36	22 . P . QR	58,60
45 . P . P	47,54	21 . P . QR	58,75
32 . P . QR	47,73	81 . P . CS	58,89
46 . P . CS	47,92	07 . P . FS	59,04
05 . C . LD	48,10	38 . C . PA	59,19
89 . P . QR	48,29	58 . P . FS	59,33
25 . C . PA	48,47	81 . P . QPe	59,48
17 . P . PP	48,65	52 . C . CB	59,62
75 . P . QR	48,83	22 . P . DF	59,77
89 . P . P	49,02	54 . C . QR	59,91
16 . P . CS	49,19	09 . P . QPu	60,06
12 . P . FS	49,37	81 . P . QR	60,20
46 . P . DF	49,55	55 . P . DF	60,34
09 . D . FS	49,73	04 . P . DF	60,48
67 . D . FS	49,91	54 . C . FS	60,63
67 . C . FS	50,09	84 . P . QPu	60,77
55 . C . CB	50,26	27 . P . QR	60,91
24 . P . DR	50,44	68 . P . DF	61,05
86 . P . DF	50,61	09 . C . FS	61,19
58 . P . DR	50,79	67 . C . DR	61,33
89 . P . CB	50,96	76 . P . DF	61,46
52 . C . QR	51,14	08 . P . DR	61,60
87 . P . DF	51,31	68 . C . DF	61,74
83 . P . QJ	51,49	45 . D . P	61,88
26 . P . FS	51,66	51 . P . QPe	62,01
63 . P . PA	51,83	40 . C . PP	62,15
88 . C . QR	52,00	65 . C . AA	62,29
47 . P . QR	52,17	32 . P . QPu	62,42
88 . D . FS	52,34	77 . P . QPe	62,56
23 . P . CS	52,51	82 . P . QPu	62,69
70 . C . CB	52,68	01 . P . FS	62,83
30 . P . QJ	52,84	52 . C . FS	62,96
65 . C . FS	53,01	57 . C . FS	63,10
48 . P . CS	53,18	29 . P . QR	63,23
52 . P . DF	53,34	04 . D . PN	63,37
15 . P . PS	53,51	30 . P . P	63,50
52 . P . DR	53,67	67 . C . AA	63,64
48 . P . FS	53,84	39 . C . PA	63,77
10 . P . DF	54,00	42 . P . QPe	63,90
09 . P . FS	54,16	70 . P . DR	64,04
03 . P . QPe	54,32	19 . P . FS	64,17
71 . P . QR	54,48	69 . P . AA	64,30
38 . P . AA	54,64	12 . P . DF	64,43
06 . C . PS	54,80	55 . P . QR	64,56
67 . D . DR	54,96	73 . C . AA	64,69
01 . C . AA	55,12	86 . P . QPe	64,82
28 . P . QR	55,28	38 . C . AA	64,95
88 . C . DF	55,43	56 . P . DF	65,07
52 . C . QPe	55,59	70 . P . QPe	65,20
34 . P . QJ	55,75	52 . P . QPe	65,33
57 . P . DR	55,90	31 . P . QR	65,46
17 . P . QR	56,06	88 . C . PA	65,58
Individus département x propriété x essence	Part dans la surface terrière initiale cumulée	Individus département x propriété x essence	Part dans la surface terrière initiale cumulée

Annexes de la partie IV

	(%)		(%)
36 . P . DF	65,71	38 . P . PS	73,48
61 . P . DF	65,84	81 . P . DF	73,58
55 . C . DF	65,97	80 . P . DF	73,68
88 . P . FS	66,09	65 . P . QR	73,78
21 . P . CB	66,22	61 . P . QR	73,88
03 . P . DF	66,34	42 . P . DF	73,98
07 . P . DR	66,47	66 . P . DR	74,08
81 . P . QPu	66,59	69 . P . PM	74,18
01 . C . DF	66,71	55 . D . DR	74,28
18 . P . P	66,84	28 . P . QPe	74,38
61 . P . QPe	66,96	21 . C . CB	74,48
49 . P . QR	67,08	57 . C . QR	74,58
15 . P . DF	67,21	45 . D . QR	74,68
63 . P . QPe	67,33	14 . P . DF	74,77
52 . P . QR	67,45	12 . P . PS	74,87
18 . P . CB	67,57	88 . C . QPe	74,97
34 . P . QPu	67,69	66 . D . DR	75,07
39 . D . DF	67,81	29 . P . DF	75,17
01 . P . PA	67,93	75 . D . QR	75,26
04 . C . PS	68,05	51 . P . CB	75,36
69 . P . QPe	68,17	21 . D . QPe	75,46
05 . C . PS	68,29	08 . P . QR	75,55
67 . C . PA	68,41	70 . P . QR	75,65
23 . P . PA	68,52	54 . D . FS	75,74
06 . P . QPu	68,64	52 . P . FS	75,84
88 . C . DR	68,76	60 . P . QR	75,93
54 . C . CB	68,88	21 . C . FS	76,03
23 . P . FS	68,99	89 . C . QPe	76,12
10 . P . QPe	69,11	04 . P . FS	76,22
51 . P . QR	69,23	70 . C . DF	76,31
35 . P . DF	69,34	55 . P . CB	76,40
02 . P . FE	69,46	67 . P . PA	76,50
65 . P . FS	69,57	05 . C . DR	76,59
30 . P . QPu	69,69	68 . C . DR	76,68
75 . D . DF	69,80	52 . D . FS	76,77
77 . P . QR	69,91	68 . C . PA	76,86
56 . P . QR	70,03	73 . C . DF	76,95
47 . P . DF	70,14	17 . P . CS	77,04
48 . D . DR	70,25	88 . P . DR	77,13
35 . P . QR	70,37	28 . P . DF	77,22
10 . P . P	70,48	57 . C . QPe	77,31
26 . D . PN	70,59	03 . P . DR	77,40
88 . P . AA	70,70	30 . D . DF	77,49
39 . C . FS	70,81	64 . C . AA	77,58
55 . D . FS	70,92	82 . P . DF	77,66
70 . P . CB	71,03	21 . D . FS	77,75
67 . D . AA	71,14	07 . P . AA	77,84
67 . P . DF	71,25	69 . P . DF	77,93
43 . P . FS	71,36	88 . P . QR	78,01
21 . C . QR	71,47	57 . D . QR	78,10
54 . P . DF	71,58	53 . P . QR	78,19
25 . P . FS	71,69	04 . D . PS	78,27
21 . C . DF	71,80	33 . P . CS	78,36
60 . D . FS	71,91	76 . P . QR	78,44
58 . D . QPe	72,01	01 . P . AA	78,52
74 . P . AA	72,12	67 . C . QPe	78,61
79 . P . DF	72,23	61 . P . DR	78,69
06 . P . DF	72,33	06 . C . LD	78,77
67 . C . DF	72,44	74 . C . AA	78,85
15 . P . QPe	72,54	77 . D . QPe	78,94
46 . P . QR	72,65	36 . P . CB	79,02
57 . D . QPe	72,75	58 . C . QPe	79,10
26 . C . FS	72,86	35 . P . P	79,18
52 . C . DF	72,96	06 . C . AA	79,26
73 . P . FS	73,06	67 . C . QR	79,34
39 . P . AA	73,17	63 . C . PS	79,42
02 . P . QR	73,27	61 . D . QPe	79,50
55 . P . DR	73,37	06 . P . DR	79,58
Individus département x propriété x essence	Part dans la surface terrière initiale cumulée	Individus département x propriété x essence	Part dans la surface terrière initiale cumulée

Annexe IV.8

	(%)		(%)
57 . C . CB	79,66	62 . P . DF	84,53
67 . D . PA	79,74	09 . D . AA	84,59
21 . P . FS	79,82	49 . P . QPe	84,66
42 . P . PA	79,90	02 . D . FS	84,72
55 . P . FS	79,98	55 . D . CB	84,79
07 . P . QPe	80,06	16 . P . PP	84,85
54 . C . DF	80,14	55 . D . DF	84,91
14 . P . QR	80,21	57 . P . CB	84,98
08 . P . FE	80,29	54 . P . CB	85,04
59 . D . QR	80,37	82 . P . QR	85,10
08 . P . QPe	80,44	48 . P . DR	85,17
38 . C . FS	80,52	70 . C . DR	85,23
08 . P . CB	80,60	66 . P . QPu	85,29
08 . C . QPe	80,67	63 . C . AA	85,35
80 . P . FS	80,75	65 . C . DF	85,42
40 . P . CS	80,83	55 . D . QR	85,48
44 . P . QR	80,90	31 . C . DF	85,54
51 . P . FE	80,98	45 . P . QPe	85,60
27 . P . CB	81,05	54 . P . FS	85,67
44 . P . DF	81,13	54 . C . QPe	85,73
47 . P . QPu	81,20	44 . P . P	85,79
29 . P . DR	81,28	55 . C . QPe	85,85
68 . C . QPe	81,35	10 . C . QR	85,91
31 . C . FS	81,43	42 . P . PM	85,97
08 . C . DF	81,50	85 . P . QR	86,03
34 . P . P	81,57	30 . D . P	86,09
81 . P . FS	81,65	57 . P . FS	86,15
43 . P . QPe	81,72	60 . P . FS	86,21
54 . C . DR	81,79	15 . P . CS	86,27
01 . C . FS	81,87	27 . P . P	86,33
22 . P . DR	81,94	36 . P . P	86,39
79 . P . QR	82,01	74 . C . FS	86,45
53 . P . DF	82,08	22 . P . FS	86,51
88 . D . PA	82,15	21 . D . CB	86,57
10 . P . CB	82,23	67 . P . DR	86,62
09 . P . QR	82,30	57 . P . QR	86,68
57 . D . CB	82,37	68 . P . FS	86,74
05 . P . QPu	82,44	27 . P . FS	86,80
26 . D . PS	82,51	76 . P . FS	86,85
72 . P . QR	82,58	03 . P . CB	86,91
51 . P . P	82,65	08 . D . QPe	86,97
38 . C . DF	82,72	02 . P . CB	87,02
68 . D . DF	82,79	05 . C . FS	87,08
57 . P . DF	82,86	48 . P . DF	87,13
05 . P . LD	82,93	09 . P . FE	87,19
43 . P . PA	83,00	23 . P . PS	87,25
06 . P . LD	83,06	03 . P . FS	87,30
08 . D . DR	83,13	57 . P . QPe	87,36
52 . P . FE	83,20	50 . P . DF	87,41
41 . D . QR	83,27	69 . P . CS	87,47
54 . D . DR	83,34	42 . P . FS	87,52
10 . C . QPe	83,40	74 . C . DF	87,58
26 . C . AA	83,47	47 . P . CS	87,63
73 . C . FS	83,54	54 . P . QR	87,69
75 . P . QPe	83,61	76 . P . QPe	87,74
01 . C . PA	83,68	15 . P . AA	87,79
05 . P . FS	83,74	67 . D . QPe	87,85
04 . C . LD	83,81	07 . P . PM	87,90
71 . P . PM	83,88	64 . C . DF	87,96
60 . P . QPe	83,94	61 . D . FS	88,01
70 . P . FE	84,01	44 . P . QPe	88,06
81 . P . PA	84,07	08 . D . DF	88,12
22 . P . P	84,14	48 . D . FS	88,17
34 . D . DF	84,21	05 . P . DF	88,22
85 . P . DF	84,27	71 . P . CS	88,27
19 . P . DR	84,34	01 . P . DR	88,33
04 . D . LD	84,40	23 . P . PM	88,38
70 . P . FS	84,46	79 . P . CS	88,43
Individus département x propriété x essence	Part dans la surface terrière initiale cumulée	Individus département x propriété x essence	Part dans la surface terrière initiale cumulée

Annexes de la partie IV

	(%)		(%)
60 . P . CB	88,48	65 . C . DR	91,65
89 . C . CB	88,53	54 . D . QR	91,69
77 . P . CB	88,59	60 . D . CB	91,73
29 . P . P	88,64	26 . D . AA	91,77
71 . C . QPe	88,69	26 . D . FS	91,81
45 . P . CB	88,74	02 . D . QR	91,85
04 . C . FS	88,79	04 . D . DR	91,90
19 . P . QPe	88,84	62 . P . FS	91,94
15 . C . PS	88,89	13 . P . QI	91,98
63 . C . PA	88,95	66 . D . FS	92,02
77 . P . FE	89,00	87 . P . DR	92,06
25 . P . FE	89,05	67 . P . FS	92,10
21 . P . FE	89,10	76 . D . P	92,14
19 . P . PM	89,15	75 . P . P	92,18
05 . D . PS	89,20	04 . P . LD	92,22
46 . P . DR	89,25	15 . C . FS	92,26
06 . C . PA	89,30	68 . P . AA	92,30
31 . C . AA	89,34	03 . D . FS	92,34
41 . P . CB	89,39	08 . C . QR	92,38
02 . D . DF	89,44	02 . P . QPe	92,42
87 . P . PM	89,49	31 . P . FS	92,46
52 . D . CB	89,54	62 . P . FE	92,50
26 . P . PN	89,59	10 . P . FE	92,54
71 . C . QR	89,64	68 . P . PA	92,58
09 . P . AA	89,69	26 . P . DR	92,62
02 . D . CB	89,73	41 . D . P	92,66
54 . D . CB	89,78	77 . D . DF	92,70
16 . P . QPu	89,83	75 . D . P	92,74
60 . D . QR	89,88	61 . P . FS	92,77
68 . C . QR	89,92	26 . C . PS	92,81
39 . P . FE	89,97	38 . D . AA	92,85
57 . C . DR	90,02	21 . C . DR	92,89
73 . P . AA	90,07	76 . P . FE	92,93
05 . C . AA	90,11	76 . P . DR	92,96
60 . P . FE	90,16	89 . C . QR	93,00
03 . P . P	90,20	30 . D . DR	93,04
77 . D . P	90,25	66 . P . FS	93,07
21 . D . DF	90,30	51 . P . DR	93,11
31 . P . QPu	90,34	09 . C . AA	93,15
27 . P . DR	90,39	25 . C . FE	93,19
52 . C . DR	90,43	34 . D . P	93,22
42 . P . QR	90,48	56 . P . DR	93,26
10 . C . CB	90,52	54 . D . QPe	93,30
09 . D . DR	90,57	48 . P . QPe	93,33
63 . P . PM	90,61	80 . P . QR	93,37
23 . P . DR	90,66	04 . D . QPu	93,41
87 . P . FS	90,70	05 . D . LD	93,44
39 . D . AA	90,75	32 . P . CS	93,48
08 . C . DR	90,79	13 . P . QPu	93,52
64 . C . QR	90,83	34 . P . DR	93,55
41 . D . QPe	90,88	89 . P . DR	93,59
50 . P . QR	90,92	04 . C . QPu	93,62
14 . P . QPe	90,96	29 . P . FS	93,66
60 . D . QPe	91,01	63 . C . FS	93,69
77 . P . P	91,05	84 . P . DF	93,73
65 . C . QR	91,10	14 . P . FS	93,77
53 . P . QPe	91,14	71 . P . FS	93,80
08 . P . FS	91,18	87 . P . PA	93,84
12 . P . DR	91,22	80 . P . FE	93,87
38 . D . PA	91,27	76 . D . QPe	93,91
71 . C . DF	91,31	81 . P . DR	93,94
43 . P . DF	91,35	82 . P . CS	93,98
61 . D . DR	91,39	69 . P . PS	94,01
04 . P . DR	91,44	08 . D . FS	94,04
84 . P . QI	91,48	64 . P . FE	94,08
80 . P . CB	91,52	52 . D . QR	94,11
61 . P . P	91,56	37 . P . CB	94,15
45 . D . QPe	91,61	04 . P . PN	94,18
Individus département x propriété x essence	Part dans la surface terrière initiale cumulée	Individus département x propriété x essence	Part dans la surface terrière initiale cumulée

Annexe IV.8

	(%)		(%)
67 . D . DF	94,21	50 . P . FS	96,22
75 . P . CB	94,25	26 . C . DF	96,24
52 . D . QPe	94,28	42 . P . CS	96,27
27 . P . FE	94,31	05 . P . DR	96,29
77 . D . FS	94,35	40 . C . QR	96,32
23 . P . QPe	94,38	68 . P . QPe	96,34
68 . D . PA	94,41	15 . C . AA	96,37
85 . P . P	94,45	08 . D . QR	96,39
48 . D . PA	94,48	09 . D . DF	96,42
59 . D . DF	94,51	60 . D . P	96,44
38 . D . FS	94,54	04 . C . AA	96,46
57 . D . DF	94,58	04 . D . FS	96,49
01 . P . FE	94,61	62 . P . QR	96,51
46 . P . PP	94,64	55 . P . FE	96,54
54 . D . DF	94,67	14 . P . DR	96,56
09 . P . DR	94,71	63 . P . CS	96,58
88 . D . DR	94,74	04 . C . PA	96,60
05 . D . PN	94,77	66 . D . DF	96,63
81 . P . PM	94,80	12 . P . PM	96,65
86 . P . CB	94,83	88 . D . DF	96,67
68 . D . AA	94,87	31 . P . FE	96,69
75 . D . QPe	94,90	05 . D . AA	96,72
54 . P . QPe	94,93	12 . P . PA	96,74
02 . D . QPe	94,96	64 . P . DR	96,76
77 . D . QR	94,99	87 . P . QPe	96,78
26 . C . QPu	95,02	08 . C . FS	96,81
87 . P . PS	95,05	58 . P . P	96,83
39 . C . FE	95,08	06 . P . AA	96,85
34 . D . DR	95,11	56 . P . FS	96,87
58 . D . CB	95,14	73 . C . PS	96,89
89 . C . DF	95,17	06 . C . DR	96,91
68 . D . QPe	95,20	53 . P . P	96,93
75 . P . FE	95,23	58 . C . DF	96,95
89 . P . FE	95,26	67 . P . AA	96,98
69 . P . PA	95,29	28 . P . CB	97,00
73 . C . LD	95,32	52 . D . DF	97,02
67 . P . QPe	95,35	21 . C . FE	97,04
61 . D . P	95,38	55 . C . FE	97,06
45 . D . CB	95,41	57 . D . FE	97,08
68 . D . DR	95,44	38 . P . QPu	97,10
79 . P . QPu	95,47	02 . P . FS	97,12
60 . P . P	95,50	21 . D . QR	97,13
39 . D . FS	95,53	70 . C . FE	97,15
58 . C . DR	95,55	72 . P . CB	97,17
89 . P . FS	95,58	15 . P . PA	97,19
38 . D . DF	95,61	10 . P . DR	97,21
54 . P . FE	95,64	76 . D . QR	97,23
88 . P . QPe	95,66	39 . C . DR	97,25
67 . P . QR	95,69	58 . C . CB	97,27
76 . D . DR	95,72	89 . C . FS	97,29
63 . P . DR	95,75	73 . P . LD	97,31
05 . D . FS	95,77	31 . C . QR	97,33
09 . C . DF	95,80	66 . C . FS	97,35
38 . C . PS	95,83	66 . D . AA	97,37
88 . D . QPe	95,85	73 . C . DR	97,38
59 . D . CB	95,88	76 . D . CB	97,40
55 . D . QPe	95,91	52 . D . DR	97,42
57 . C . DF	95,93	65 . P . FE	97,44
67 . D . QR	95,96	13 . P . DF	97,46
43 . P . QR	95,99	71 . P . DR	97,48
06 . C . DF	96,01	35 . P . FS	97,50
10 . C . DF	96,04	58 . P . FE	97,51
71 . P . PA	96,06	57 . P . FE	97,53
61 . D . QR	96,09	01 . C . DR	97,55
65 . P . AA	96,12	81 . P . PS	97,57
60 . D . DF	96,14	48 . D . PS	97,59
88 . D . QR	96,17	26 . P . AA	97,60
16 . P . DR	96,19	41 . P . DR	97,62

Individus département x
propriété x essence

Part dans la surface terrière
initiale cumulée

Individus département x
propriété x essence

Part dans la surface terrière
initiale cumulée

Annexes de la partie IV

	(%)
58 . D . FS	97,64
48 . P . QPu	97,66
55 . C . DR	97,68
71 . P . PS	97,69
58 . C . QR	97,71
19 . P . QPu	97,73
43 . P . QPu	97,75
71 . P . AA	97,76
68 . P . QR	97,78
08 . D . CB	97,80
68 . D . FS	97,82
52 . C . FE	97,83
45 . D . DF	97,85
08 . C . CB	97,87
04 . C . DF	97,88
76 . P . P	97,90
76 . D . DF	97,92
26 . D . PA	97,94
35 . P . DR	97,95
34 . D . QI	97,97
18 . P . DR	97,99
17 . P . QPu	98,00
25 . P . DR	98,02
75 . D . CB	98,04
64 . C . DR	98,05
23 . P . AA	98,07
73 . P . PS	98,08
28 . P . P	98,10
31 . P . DR	98,12
25 . C . DR	98,13
76 . P . CB	98,15
06 . C . QPu	98,16
43 . P . PM	98,18
18 . P . FS	98,19
59 . D . FS	98,21
51 . P . FS	98,22
61 . P . CB	98,24
63 . C . DF	98,25
68 . D . QR	98,27
42 . P . DR	98,28
03 . D . CB	98,30
26 . C . PA	98,31
65 . P . QPu	98,33
02 . D . FE	98,34
55 . P . QPe	98,36
39 . D . PA	98,37
14 . P . P	98,38
58 . D . QR	98,40
10 . P . FS	98,41
05 . P . PN	98,43
79 . P . PP	98,44
53 . P . DR	98,45
26 . P . PA	98,47
18 . P . FE	98,48
07 . P . PA	98,49
61 . P . FE	98,51
58 . C . FS	98,52
05 . D . DR	98,53
05 . C . QPu	98,55
05 . P . AA	98,56
85 . P . QPe	98,57
66 . P . FE	98,59
15 . C . PA	98,60
26 . D . QPu	98,61
77 . D . CB	98,63
89 . C . P	98,64
69 . P . FS	98,65
75 . D . FS	98,66

Individus département x
propriété x essence Part dans la surface terrière
initiale cumulée

	(%)
04 . C . DR	98,68
54 . C . FE	98,69
72 . P . DR	98,70
03 . D . QR	98,71
26 . D . DF	98,73
35 . P . QPe	98,74
34 . D . QPu	98,75
62 . P . CB	98,76
32 . P . PP	98,77
05 . C . DF	98,79
69 . P . QR	98,80
50 . P . DR	98,81
53 . P . FS	98,82
30 . D . QI	98,83
39 . P . DR	98,84
80 . P . QPe	98,86
33 . P . QPu	98,87
10 . C . FS	98,88
68 . P . DR	98,89
80 . P . P	98,90
30 . D . QPu	98,91
58 . D . DF	98,92
59 . D . QPe	98,94
59 . D . FE	98,95
69 . P . DR	98,96
38 . D . PN	98,97
66 . C . DF	98,98
31 . C . DR	98,99
02 . P . P	99,00
03 . D . P	99,01
03 . P . FE	99,02
05 . C . PA	99,03
50 . P . QPe	99,04
21 . D . DR	99,05
04 . C . PN	99,06
62 . P . QPe	99,07
81 . P . AA	99,08
10 . C . P	99,09
55 . D . FE	99,10
44 . P . DR	99,11
06 . C . FS	99,12
54 . D . FE	99,13
72 . P . FS	99,14
38 . C . DR	99,15
64 . C . FE	99,16
63 . C . QPe	99,17
04 . D . DF	99,18
48 . D . AA	99,19
73 . P . QPu	99,20
31 . C . QPu	99,21
08 . D . FE	99,22
08 . C . FE	99,23
22 . P . QPe	99,24
41 . D . DF	99,25
31 . P . AA	99,26
15 . C . QPe	99,26
15 . C . DF	99,27
26 . C . PN	99,28
04 . P . PA	99,29
45 . P . DR	99,30
71 . C . CS	99,31
73 . P . DR	99,32
80 . P . DR	99,33
28 . P . FE	99,33
47 . P . DR	99,34
59 . D . P	99,35
15 . C . QR	99,36
06 . P . PA	99,37

Individus département x
propriété x essence Part dans la surface terrière
initiale cumulée

Annexe IV.8

	(%)
48 . P . AA	99,38
57 . C . FE	99,38
74 . P . PS	99,39
41 . D . CB	99,40
01 . C . FE	99,41
48 . P . PA	99,42
42 . P . QPu	99,43
61 . D . DF	99,43
75 . P . FS	99,44
02 . P . DR	99,45
45 . P . FE	99,46
38 . P . DR	99,47
05 . D . QPu	99,47
50 . P . P	99,48
41 . D . FS	99,49
03 . D . DR	99,50
48 . D . DF	99,50
38 . D . PS	99,51
09 . C . QPu	99,52
06 . P . FS	99,52
65 . C . FE	99,53
60 . D . FE	99,54
87 . P . AA	99,54
63 . C . QR	99,55
17 . P . DR	99,56
62 . P . P	99,56
48 . P . QR	99,57
32 . P . DR	99,58
41 . P . FE	99,58
05 . D . DF	99,59
40 . C . DF	99,60
73 . C . QPu	99,60
83 . P . DR	99,61
36 . P . FE	99,61
38 . P . PN	99,62
45 . D . FS	99,63
15 . P . QPu	99,63
66 . C . AA	99,64
58 . D . DR	99,64
04 . D . PA	99,65
52 . D . FE	99,66
65 . C . QPu	99,66
37 . P . FE	99,67
15 . P . DR	99,67
21 . D . FE	99,68
36 . P . DR	99,68
43 . P . DR	99,69
02 . D . P	99,69
09 . D . QPu	99,70
79 . P . DR	99,70
48 . D . CS	99,71
60 . D . DR	99,71
82 . P . PP	99,72
38 . P . LD	99,72
04 . P . AA	99,73
74 . C . LD	99,73
77 . P . DR	99,74
72 . P . FE	99,74
06 . C . PN	99,75
04 . D . AA	99,75
63 . P . QPu	99,76
12 . P . AA	99,76
58 . C . P	99,77
74 . C . DR	99,77
09 . C . DR	99,78
74 . P . DR	99,78
09 . D . QR	99,79
44 . P . FS	99,79

Individus département x Part dans la surface terrière
Individus département x

propriété x essence	initiale cumulée (%)
19 . P . AA	99,79
64 . P . AA	99,80
85 . P . DR	99,80
66 . D . QPu	99,81
64 . P . QPu	99,81
03 . D . DF	99,82
26 . C . DR	99,82
65 . P . DR	99,82
30 . P . DR	99,83
05 . C . PN	99,83
71 . P . QPu	99,83
71 . C . DR	99,84
71 . C . QPu	99,84
38 . C . LD	99,85
75 . P . DR	99,85
36 . P . FS	99,85
71 . C . FS	99,86
26 . D . DR	99,86
66 . P . AA	99,86
76 . D . FE	99,87
89 . C . DR	99,87
48 . D . QPe	99,87
31 . C . FE	99,88
75 . D . FE	99,88
39 . D . DR	99,88
77 . D . DR	99,88
09 . C . QR	99,89
33 . P . DR	99,89
63 . C . DR	99,89
15 . P . PM	99,90
28 . P . DR	99,90
39 . D . FE	99,90
77 . P . FS	99,91
37 . P . FS	99,91
74 . P . QPu	99,91
05 . D . PA	99,91
38 . D . DR	99,92
28 . P . FS	99,92
56 . P . QPe	99,92
62 . P . DR	99,93
06 . P . PN	99,93
49 . P . DR	99,93
48 . P . PM	99,93
49 . P . CB	99,93
59 . D . DR	99,94
40 . P . DR	99,94
71 . C . PS	99,94
74 . C . PS	99,94
09 . C . FE	99,95
60 . P . DR	99,95
09 . D . FE	99,95
37 . P . DR	99,95
66 . D . FE	99,95
45 . P . FS	99,96
86 . P . FE	99,96
10 . C . FE	99,96
86 . P . DR	99,96
41 . P . FS	99,96
82 . P . DR	99,96
07 . P . QR	99,97
73 . C . PN	99,97
74 . P . LD	99,97
02 . D . DR	99,97
74 . C . QPu	99,97
38 . C . QPu	99,97
66 . C . QPu	99,98
49 . P . FE	99,98
58 . D . P	99,98

Part dans la surface terrière

Annexes de la partie IV

propriété x essence	initiale cumulée (%)
71 . C . PM	99,98
58 . C . FE	99,98
38 . D . LD	99,98
66 . P . QR	99,98
43 . P . CS	99,98
77 . D . FE	99,99
49 . P . FS	99,99
29 . P . QPe	99,99
74 . C . PN	99,99
48 . D . QPu	99,99
63 . C . CS	99,99
41 . D . DR	99,99
05 . P . PA	99,99
38 . C . PN	99,99
85 . P . FS	99,99
15 . C . DR	99,99
61 . D . CB	99,99
10 . C . DR	100,00
71 . C . AA	100,00
63 . C . PM	100,00
66 . C . FE	100,00
15 . C . CS	100,00
84 . P . DR	100,00
26 . D . LD	100,00
75 . D . DR	100,00
40 . C . CS	100,00
13 . P . DR	100,00
15 . C . PM	100,00
86 . P . FS	100,00
61 . D . FE	100,00
89 . C . FE	100,00
48 . D . PM	100,00
45 . D . DR	100,00
73 . P . PN	100,00
38 . D . QPu	100,00

Tableau A.IV.8.1 Part cumulée de la surface terrière initiale représentée par les individus département x propriété x essence. En gris : les individus écartés de l'analyse

Annexe IV.9. Création des profils diamétriques

La création de ces profils se base sur la donnée de diamètre à 1,30m de l'IFN. Ces diamètres sont classés dans des classes de taille de bois : petit bois (PB ; entre 7,5 et 22,5 cm), bois moyen (BM ; entre 22,5 et 37,5 cm), gros bois (GB ; entre 37,5 et 52,5 cm) et très gros bois (TGB ; diamètre supérieur à 52,5 cm). Pour chaque individu département x propriété x essence, la part de surface terrière dans chaque classe de diamètre à $t1_i$ a été calculée.

Une classification ascendante hiérarchique à partir de ces parts en surface terrière dans chaque classe a ensuite permis de regrouper les individus en profils diamétriques similaires.

Afin de permettre une lecture relativement facile de cette donnée, il a été choisi de distinguer cinq classes.

Annexe IV.10. Détail des 7 facies identifiés au niveau 1 de l'analyse

Facies	Strates incluses	Part de la strate dans la surface terrière initiale du facies (%)	Part de la strate dans l'expansion totale du facies (%)	IE de la strate	Stock à l'hectare (m²/ha)
1	Ju privé	14,7	11,1	1,0	20,4
	MC Privé	85,3	88,9	1,4	18,7
2	GO privé	100,0	100,0	1,4	18,2
3	MC domanial	5,0	4,1	0,8	22,4
	MC communal	15,0	14,3	1,2	18,0
	Me privé	80,0	81,6	1,2	11,3
4	CN communal	4,0	5,6	1,7	16,1
	Al privé	39,8	41,1	1,2	18,2
	Py privé	18,8	23,4	1,4	16,9
	Al communal	18,8	13,2	0,8	23,2
	Al domanial	6,3	6,1	1,2	20,1
	Py communal	9,7	10,2	1,2	22,1
	Py domanial	2,8	0,5	0,2	21,9
	(5) SO communal	100	100	1,1	14,6
6	CN privé	44,0	38,9	0,8	17,9
	Me domanial	1,0	0,8	0,9	19,7
	SO privé	37,3	42,5	1,1	16,9
	GE privé	13,1	13,6	1,0	18,7
	Vo Privé	4,6	4,2	0,9	24,2
7	GE communal	17,6	51,1	1,0	18,4
	CN domanial	16,7	11,4	0,3	20,9
	Ju communal	13,8	21,6	0,8	21,7
	Vo communal	17,8	10,2	0,3	24,9
	Ju domanial	1,1	0,0	0,2	21,3
	GE domanial	14,4	4,5	0,2	21,2
	Vo domanial	8,6	1,1	0,1	25,9

Tableau A.IV.10.1 Détail des 7 facies identifiés au niveau 1 de l'analyse

Annexe IV.11. Détail des 14 facies identifiés au niveau 2 de l'analyse

Facies	Strates GRECO x propriété x essence	Part de la strate dans la surface terrière initiale (%)	Part de la strate dans l'expansion totale (%)	IE de la strate	Diamètre Moyen du GPE (cm)
1	MC.P.Pm	0,53	4,36	8,16	15,52
	Me.P.DR	0,04	0,21	5,56	16,95
2	GO.P.DR	0,19	0,87	4,46	14,93
3	CN.P.DR	0,53	1,63	3,07	14,68
	MC.C.DF	0,04	0,2	4,51	11,33
	MC.P.DR	0,44	1,7	3,89	16,13
	MC.P.Pa	0,73	3	4,13	14,6
4	Al.P.Ld	0,19	0,51	2,72	19,79
	CN.C.Qpe	0,26	0,54	2,1	20,91
	CN.D.Qpe	0,73	1,76	2,42	21,3
	GO.P.Qpe	0,15	0,39	2,66	16,48
	Ju.C.Fe	0,04	0,13	3,3	14,83
	MC.C.Qr	0,05	0,09	1,85	15,1
	SO.P.Qpu	1,19	4,56	3,82	12,49
	Vo.C.Qpe	0,27	0,61	2,27	21,45
5	CN.D.DR	0,04	0,03	0,76	15,02
	CN.P.Fe	0,5	0,59	1,18	15,35
	GE.C.Cb	0,83	1,4	1,69	11,86
	GE.C.DR	0,33	0,8	2,45	16,35
	GE.P.DR	1,17	2,13	1,82	15,63
	Ju.D.Aa	0,05	0,07	1,53	22,88
	Ju.P.Fe	0,14	0,24	1,78	14,16
	Py.P.Fe	0,09	0,17	1,82	14,99
	SO.C.Pp	0,14	0,22	1,52	20,23
	SO.P.DR	0,24	0,53	2,25	16,14
	Vo.C.Pa	0,35	0,81	2,29	17,37
	Vo.P.Pa	0,54	0,93	1,72	14,39
6	Al.C.Ps	0,46	0,58	1,27	19,2
	Al.D.Ld	0,11	0,13	1,22	20,93
	Al.P.Pa	1,01	1,74	1,72	20,09
	Ju.P.Aa	0,39	0,71	1,79	22,37
	Py.C.Aa	0,33	0,63	1,92	23,17
	Py.C.Qr	0,09	0,17	1,88	20,24
	Py.P.Qr	0,67	1,41	2,1	19,7

Tableau A.IV.11.1 Détail des 14 facies identifiés au niveau 2 de l'analyse

Annexes de la partie IV

Facies	Strates GRECO x propriété x essence	Part de la strate dans la surface terrière initiale (%)	Part de la strate dans l'expansion totale (%)	IE de la strate	Diamètre Moyen du GPE (cm)
	Al.C.Aa	0,56	0,61	1,08	21,87
	Al.C.Ld	0,35	0,3	0,85	24,16
	Al.C.Qpu	0,07	0,19	2,65	10,86
	Al.D.Fs	0,08	0,08	1	15,3
	Al.D.Pn	0,29	0,46	1,55	16,06
	Al.P.Fs	0,83	0,94	1,13	14,54
	Al.P.Qpu	0,83	1,51	1,81	11,83
	CN.P.Fs	0,56	0,41	0,73	17,8
	CN.P.Qpe	3,58	4,98	1,39	16,61
	GE.C.Fs	1	0,57	0,57	23,26
	GE.C.Qpe	1,09	1,31	1,2	21,9
	GE.C.Qr	0,95	0,37	0,39	26,45
	GE.P.Fs	0,51	0,57	1,12	20,35
7	GE.P.Qpe	0,69	0,78	1,13	17,87
	GE.P.Qr	0,74	0,51	0,69	20,48
	Ju.C.Fs	0,44	0,55	1,23	17,66
	Ju.P.Fs	0,42	0,46	1,11	16,39
	MC.C.Fs	0,08	0,09	1,16	15,26
	MC.C.Qpe	0,05	0,12	2,19	14,01
	MC.D.Fs	0,06	0,03	0,57	16,74
	MC.P.Fs	1,59	2,44	1,53	15,74
	MC.P.Qpu	0,62	0,73	1,18	12,26
	MC.P.Qr	2,29	3,12	1,36	15,95
	Py.C.Fs	0,85	0,74	0,87	19,98
	Py.P.Fs	0,53	0,59	1,11	17,23
	SO.P.Qr	2,18	2,12	0,97	16,27
	Vo.D.Qpe	0,06	0,03	0,59	21,17
	Vo.P.Fs	0,24	0,31	1,34	19,45

Tableau A.IV.11.1 Détail des 14 facies identifiés au niveau 2 de l'analyse (suite)

Annexe IV.11

Facies	Strates	Part de la strate dans la surface terrière initiale (%)	Part de la strate dans l'expansion totale (%)	IE de la strate	Diamètre Moyen du GPE (cm)
8	Al.C.DF	0,23	0,36	1,61	12,33
	Al.C.DR	0,1	0,04	0,4	18,71
	Al.C.Pa	0,84	0,21	0,25	24,45
	Al.D.Aa	0,08	0,1	1,21	21,04
	Al.D.DR	0,04	0	-0,05	17,21
	Al.D.Ps	0,22	0,06	0,3	16,36
	Al.D.Qpu	0,04	0,05	1,38	12,09
	Al.P.Aa	0,33	0,33	1,01	21,58
	Al.P.DR	0,17	0,11	0,66	19,84
	Al.P.Ps	1,50	1,61	1,08	15,68
	Ju.C.DF	0,96	0,84	0,88	14,16
	Ju.P.Pa	0,70	0,83	1,19	18,26
	MC.D.Pa	0,03	0,07	1,98	20,67
	MC.P.Aa	1,15	1,6	1,39	19,56
	MC.P.Qpe	1,45	1,96	1,36	14,08
	Me.D.DF	0,16	0,03	0,18	15,88
	Me.D.DR	0,04	0,05	1,34	20,43
	Me.D.P	0,10	0,13	1,24	18,55
	Me.P.P	1,13	1,85	1,63	17,5
	Py.C.DR	0,20	0,33	1,65	17,25
	Py.D.DR	0,15	0,2	1,33	18,02
	Py.D.Fs	0,23	0	0,01	19,15
	Py.P.DR	0,14	0,53	3,82	16,65
9	CN.P.DF	4,56	2,73	0,6	13
	GO.P.DF	0,90	1,54	1,72	12,7
	MC.C.Pa	0,05	0,15	2,72	16,7
	MC.P.DF	2,19	2,5	1,14	12,82
10	Al.D.Pa	0,04	0,02	0,5	20,88
	Al.P.DF	2,16	2,04	0,94	13,13
	CN.D.DF	0,25	0,03	0,12	13,64
	CN.D.P	0,32	-0,13	-0,4	18,76
	GO.P.P	0,66	0,03	0,05	19,43
	Ju.P.DF	1,24	0,78	0,63	13,45
	MC.P.Ps	3,23	1,7	0,53	17,88
	Me.P.DF	0,78	0,94	1,2	14,42
	Py.C.DF	0,19	0,18	0,97	14,64
	Py.P.Aa	0,05	0,03	0,65	20,62
Py.P.DF	1,58	1,52	0,97	13,96	

Tableau A.IV.11.1 Détail des 14 facies identifiés au niveau 2 de l'analyse (suite)

Annexes de la partie IV

Facies	Strates	Part de la strate	Part de la strate dans	IE	Diamètre
	GRECO	dans la surface	l'expansion totale	de la	Moyen
	x propriété	terrière initiale	(%)	strate	du GPE
	x essence	(%)			(cm)
	Al.P.Pn	0,09	0,03	0,34	15,73
	CN.C.Cb	0,1	0,02	0,16	10,55
	CN.D.Fs	0,57	-0,18	-0,31	20,34
	CN.P.Cb	1,33	1,6	1,2	10,74
	CN.P.P	2,24	0,9	0,4	17,49
	GE.C.DF	0,61	0,32	0,52	13,27
	GE.D.Cb	0,3	0,01	0,02	11,84
	GE.D.DF	0,24	-0,04	-0,18	13,96
	GE.D.DR	0,6	0,04	0,07	19,4
	GE.P.Cb	0,72	0,5	0,7	11,7
	GE.P.DF	1,14	0,6	0,53	13,47
11	GE.P.Fe	0,28	0,14	0,5	16,45
	GO.P.Fs	0,14	0,09	0,7	15,97
	Ju.C.Pa	0,4	0,08	0,2	23,51
	Me.P.Qi	0,61	0,66	1,09	10,3
	SO.P.DF	2,28	2,49	1,09	13,36
	SO.P.Pp	7,59	5,95	0,78	21,18
	Vo.C.DF	0,42	0,18	0,43	14,24
	Vo.C.DR	0,37	-0,02	-0,06	22,29
	Vo.D.DF	0,11	0,04	0,34	13,32
	Vo.D.Pa	0,19	0,13	0,67	19,29
	Vo.P.Aa	0,16	0,07	0,43	18,53
	Vo.P.DF	0,52	0,09	0,18	14,37
	Al.C.Fs	0,44	0,22	0,5	14,21
	CN.P.Qr	3,96	1,09	0,28	16,81
	GE.D.Fs	0,68	0,06	0,09	18,94
	GE.D.Qpe	0,35	0,03	0,08	21,91
	GO.P.Qr	0,89	0,61	0,68	15,38
	Ju.C.Aa	0,61	0,38	0,62	23,13
	MC.C.Aa	0,07	0,05	0,76	19,63
12	MC.D.DR	0,12	0,01	0,07	21,29
	Me.P.Qpu	0,76	0,73	0,96	12,16
	Py.P.Qpu	0,27	0,23	0,87	12,91
	Vo.C.Aa	0,78	-0,09	-0,11	21,46
	Vo.C.Fs	0,74	0,1	0,13	19,53
	Vo.D.Aa	0,46	0,03	0,07	22,22
	Vo.D.DR	0,2	0,02	0,11	19,81
	Vo.D.Fs	0,37	-0,02	-0,06	18,84
	Vo.P.DR	0,16	0,13	0,85	19,57

Tableau A.IV.11.1 Détail des 14 facies identifiés au niveau 2 de l'analyse (suite)

Annexe IV.11

Facies	Strates GRECO x propriété x essence	Part de la strate dans la surface terrière initiale (%)	Part de la strate dans l'expansion totale (%)	IE de la strate	Diamètre Moyen du GPE (cm)
13	Ju.P.DR	0,06	0,12	2,14	17,59
	MC.P.Cs	2,26	0,2	0,09	14,58
	SO.P.Cs	1,59	0,94	0,59	12,44
14	CN.C.Qr	0,1	-0,15	-1,45	22,65
	CN.D.Cb	0,09	-0,1	-1,09	11,9
	CN.D.Qr	0,48	-1,05	-2,17	21,53
	GE.D.Qr	0,24	-0,19	-0,81	24,27
	Ju.D.DF	0,13	-0,09	-0,72	14,78
	MC.C.Ps	0,14	-0,3	-2,14	20,28
	Py.D.Aa	0,07	-0,08	-1,24	23,57
	Vo.C.Qr	0,31	-0,59	-1,88	24,5
	Vo.P.Qr	0,09	-0,15	-1,66	21,42

Tableau A.IV.11.1 Détail des 14 facies identifiés au niveau 2 de l'analyse (suite)

Annexes de la partie V

Annexe V.1. Surface décrites dans les statistiques anciennes dont la même strate département x propriété x essence n'a pas été inventoriée par l'inventaire forestier

		Inventaire forestier	
		AM	NM
Statistiques anciennes	1892	445	9170
	1908	3005	11890
	1929	0	15590

Tableau V.1.1 Surface décrites dans les statistiques anciennes dont la même strate département x propriété x essence n'a pas été inventoriée par l'inventaire forestier

Annexe V.2. Reparamétrisation du modèle de Hossfeld

Le modèle de Hossfeld utilisé dans le cadre de notre étude est l'une de ses paramétrisations explicites (Bontemps et al., 2009) :

$$D(t) = \frac{D_{max}}{1 + \left(\frac{R \cdot m \cdot C_m}{D_{max}} t + \left(\frac{D_{ini}}{D_{max} - D_{ini}} \right)^m \right)^{\frac{1}{m}}} \quad (1)$$

Où D_{max} (m^3/ha) est la densité maximale, R ($m^3/ha/an$) est la vitesse maximale d'accumulation de stock de bois, au point d'inflexion, et m est un paramètre de forme (adimensionnel), avec C_m une constante qui ne dépend que de m :

$$C_m = 4 (1 - m)^{(m-1)} (1 + m)^{-(1+m)} \text{ avec } m < 1 \quad (2)$$

Et D_{ini} (m^3/ha) la densité initiale, qui est celle d'une jeune forêt nouvellement installée.

Ce modèle peut également être reparamétré pour les besoins de cette analyse, en tentant notamment de séparer une phase d'accumulation de stock accélérée d'une phase décélérée. Si on pose D_{inf} (m^3/ha) la densité de la forêt au niveau du point d'inflexion et t_{Dinf} , le temps que met une surface forestière avant d'atteindre ce point d'inflexion, on obtient :

$$m = 1 - \frac{2D_{inf}}{D_{max}} \quad (3)$$

$$R = \left(\left(\frac{1+m}{1-m} \right)^{-m} - \left(\frac{D_{ini}}{D_{max} - D_{ini}} \right)^m \right) \frac{D_{max}}{m \cdot C_m \cdot t_{Dinf}} \quad (4)$$

Annexe V.3. Analyse de la part des forêts récentes dans le stock sur pied actuel de la forêt française

Nous avons cherché à estimer le stock sur pied actuel des forêts apparues depuis 1850 afin de connaître la part qu'il représente dans le stock total. Pour cela, les données de l'inventaire forestier entre 2013 et 2017 ont été utilisées afin de calculer le stock sur pied de plusieurs ensembles :

- le pin maritime dans la GRECO SO, provenant des boisements des landes de Gascogne au XIX^{ème} siècle (voir partie I – 1.3.1).
- le mélèze dans la GRECO des Alpes, provenant majoritairement de plantations du RTM (1860 – nos jours ; partie I – 1.3.2).
- Les résineux de la GRECO MC, provenant en grande partie des plantations du FFN (1946-1999 ; partie I – 1.3.4).
- L'Epicéa dans les GRECO autres que MC (déjà pris en compte précédemment), Alpes, Jura et Vosges.
- Le Douglas hors GRECO du MC (déjà pris en compte précédemment), implanté en France à partir de la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle mais surtout utilisé dans les boisements depuis 1965 (Ferron, 2014).
- Le pin maritime et le pin laricio hors GRECO du SO, de la Corse et du MC (déjà pris en compte précédemment).
- Le pin sylvestre dans la GRECO CN (provenant principalement de plantations du FFN).

L'ensemble du volume calculé est de 472 millions de mètres cubes soit 17,5% du stock sur pied total des forêts françaises. Ce résultat n'est cependant qu'une estimation de la part minimale de ces forêts. En effet, il ne prend en compte que les nouvelles forêts issues de plantation. Or, l'expansion en surface est principalement due à une expansion spontanée (voir partie I – 1.3) et, bien qu'à priori principalement feuillues et donc de volume à l'hectare moindre, les forêts issues de cette expansion doivent également présenter une part dans le volume forestier actuel non négligeable.

Annexe V.4. Etude de l'évolution séculaire des prélèvements

Les données des statistiques anciennes nous renseignent sur la production des forêts au début du XX^{ème} siècle. Ces productions sont présentées de façons différentes selon les statistiques en utilisant des ventilations différentes pour chacune.

La statistique agricole de 1892 sépare la production par type de propriété et mode de gestion. Cependant, un texte complémentaire permet de calculer la part du bois d'œuvre et d'industrie dans la production totale.

La statistique Daubrée sépare la production en « bois d'œuvre » et « bois de chauffage » selon chaque type de propriété.

Les productions présentées par la statistique agricole de 1929 sont les plus complexes car la ventilation présente de multiples catégories et les unités rattachées à ces catégories sont dépendantes de celles-ci. Nous avons utilisé les catégories bois d'œuvre (BO), bois de mines (BM), bois de chauffage bûche (BCB) et bois de chauffage fagots (BCF). Le BO est indiqué en mètres cubes, le BM et le BCB en stères, et le BCF en cents de fagots.

Pour convertir les stères en mètres cubes, des facteurs de cubage ont été utilisés (Mathey, 1908). Les facteurs utilisés sont : 0,74 pour les résineux, 0,65 pour le BM feuillu et 0,60 pour le BCB. La littérature estime un « cent de fagot » à 8 ou 9 livres. Or, une livre correspond à 0,5 kg en 1929. La masse volumique du bois a été estimée à 700 kg/m³ (estimation pour des bois globalement feuillus). Ainsi, un cent de fagot peut être converti en mètres cubes en multipliant par 9 et 0,5 et en divisant par 700.

Les prélèvements relevés par l'IFN ne prennent en compte que les arbres recensables (*i.e.* les arbres dont le diamètre à 1,30 m est supérieur ou égal à 7,5 cm). Ils sont donc, à priori, représentatif de la production de bois d'œuvre et d'industrie. Les prélèvements ont été calculés sur deux périodes :

- Entre les deux premiers inventaires AM à partir des flux calculés dans la partie IV. Ces flux sont calculés en surface terrière. Une conversion entre surface terrière et volume a été effectuée en utilisant un coefficient de conversion moyen calculé sur les données NM.
- A partir des données NM entre 2006 et 2011

Les données de 1892 et 1908 ne prennent pas en compte l'Alsace-Moselle du fait de son annexion à cette époque. Pour comparer les résultats entre eux, seul le bois d'œuvre et d'industrie a été pris en compte et les résultats sont rapportés à la surface et au stock initial.

Annexe de la partie VI

Annexe VI.1. Résultats du calcul des flux selon les différentes méthodes de calcul pour les forêts communales de la GRECO grand-ouest

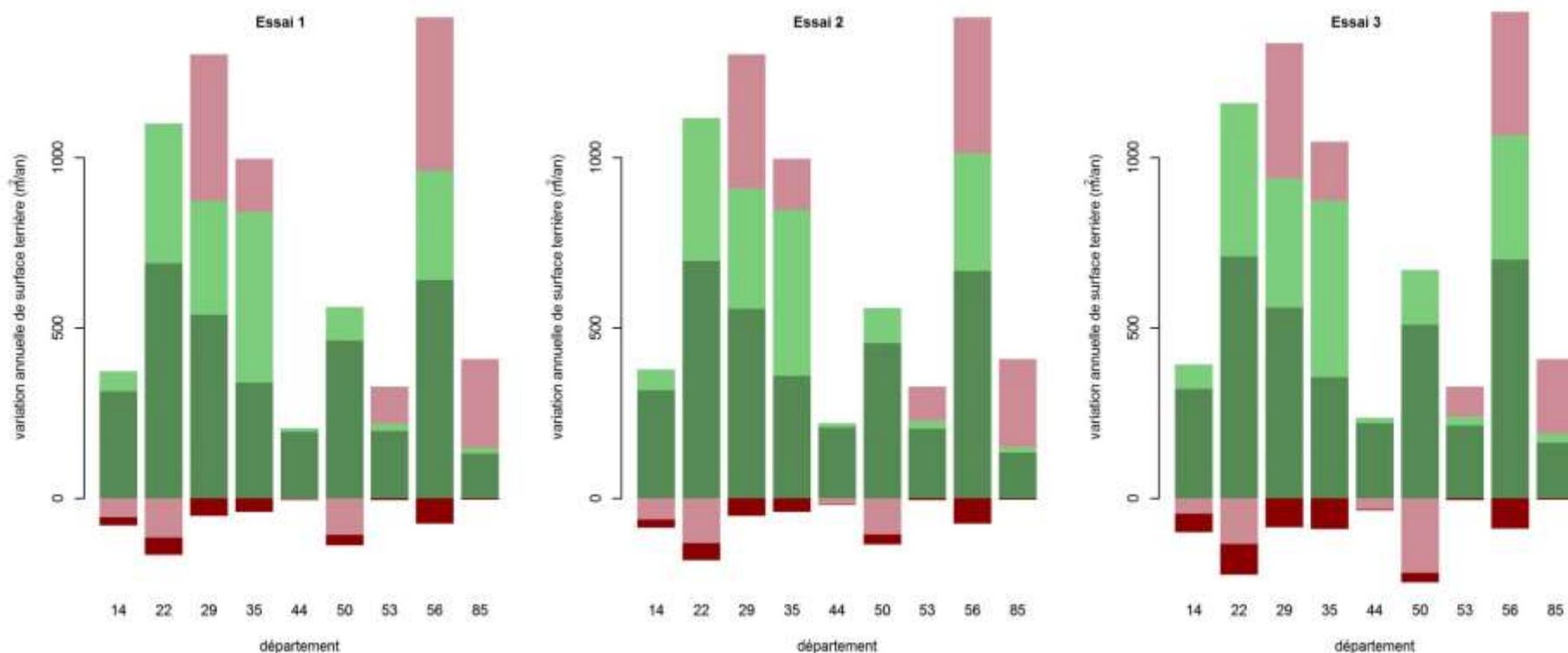


Figure A.VI.1.1. Diagrammes des flux des forêts communales de la GRECO grand-ouest selon la méthode de calcul utilisée (voir Tableau VI.1). La diminution des prélèvements négatifs s’observe principalement dans certains départements comme le 56, et le 29. On remarque aussi une apparition des prélèvements dans le département 44 ainsi qu’une augmentation de la mortalité.

Résumé

Contexte. Après des siècles de diminution, la surface forestière de la plupart des pays développés augmente, un phénomène appelé « transition forestière ». Le stock de bois sur pied présente une augmentation plus rapide mais son évolution, associée à des problématiques actuelles majeures, reste négligée. Il est indispensable de caractériser et comprendre ces évolutions, d'en connaître les causes sous-jacentes, et de les reconstituer sur le long terme afin de pouvoir situer les ressources forestières dans une trajectoire d'ensemble et anticiper leur dynamique future. Cette thèse est consacrée aux forêts françaises métropolitaines et repose principalement sur les données de l'IFN. *Objectifs.* (1) Analyser les changements de surfaces, de stock et de densité de stock et leurs hétérogénéités spatiales et temporelles, sur 40 ans (1975 – 2015) en fonction de facteurs présumés structurer ces évolutions (géographie, propriété et composition). L'existence de changements de vitesse d'expansion a été recherchée. Le lien entre les changements de stock et des propriétés de la forêt (stock et densité de stock initiaux, augmentation récente de surface) ont été analysés. (2) Analyser les mécanismes des changements de stock et décomposer l'expansion selon des ensembles forestiers homogènes du point de vue de leur dynamique. L'analyse se fonde sur une estimation des flux de stock : croissance, recrutement, mortalité et prélèvement. (3) Situer l'expansion actuelle du stock dans une dynamique séculaire. Les stocks de 1892, 1908 et 1929 (associés aux surfaces de statistiques anciennes) ont été estimés par une approche d'imputation conditionnelle de la densité. Un modèle synthétique de densification du stock des forêts a été testé afin d'étudier à quelles conditions sur cette densification il est possible de retracer la chronologie présumée du stock. *Résultats.* (1) Sur 40 ans, l'expansion en stock a été trois fois plus rapide que celle des surfaces, soulignant l'intensité de la densification des forêts, et ne présente aucun signe de saturation. Les forêts privées, et principalement les forêts feuillues, présentent les expansions de stock et de densité de stock les plus marquées, suggérant le rôle important de l'expansion naturelle et de l'abandon de terres agricoles. Les modèles statistiques révèlent l'effet positif du stock initial et des variations passées de surface sur l'expansion. (2) L'analyse des mécanismes d'expansion a mis en évidence le moindre niveau des prélèvements relativement à la croissance des forêts, et la contribution des forêts jeunes au développement des ressources. Quatre ensembles forestiers synthétiques de dynamiques distinctes et principalement composés de stocks en forêt privée expliquant l'expansion du stock sont identifiés. (3) La reconstitution du stock depuis 1850 suggère une faible densité de stock au début de la période (25 m³/ha) et une augmentation de stock de presque +300% entre 1892 et 2010, soulignant l'importance de cette expansion. Un modèle convexe a été nécessaire pour représenter la densification des forêts, attestant d'une inertie importante à la reconstitution des ressources, interprétée relativement à la baisse progressive des prélèvements ou à une reconstitution progressive de fertilité. Les analyses suggèrent enfin une évolution différenciée dans le temps du modèle de densification pour les forêts provenant de plantations. *Conclusion.* Ces travaux ont permis de montrer l'importance de l'expansion en stock et la nécessité de contextualiser cette expansion. Cette expansion ancienne ne montre pour l'instant aucune saturation et constitue un stock de carbone croissant qui ne devrait pas diminuer dans les prochaines décennies à conditions contextuelles identiques. L'analyse causale révèle qu'une part importante de l'expansion du stock ne constitue pas une ressource immédiatement disponible. Les futures politiques d'intensification des prélèvements doivent donc être circonscrites et échelonnées dans le temps.

Mots clés : expansion forestière – transition forestière - surface forestière – stock sur pied – volume – surface terrière – composition forestière – gestion forestière – déprise agricole – plantations – prélèvements – inventaire forestier national

Abstract

Context. After centuries of decrease, the forest area of most developed countries increase, a phenomenon termed "forest transition". While current increase in growing stock (GS) is greater than that in area, it remains far less studied. These changes are linked to major current issues. It is essential to assess these changes, to decipher their underlying causes, and to quantify them over the longer term in order to locate current forest resources on a broad trajectory and to anticipate their future dynamics. This thesis is dedicated to French metropolitan forests, which exhibit the most intensive changes in the growing stock in Europe, and relies on data from the French NFI program. *Objectives.* (1) Analyse forest areal, GS and GS density (GSD) changes and their spatio-temporal variations over 40 years (1975-2015). They were related to factors hypothesized to feature forest changes (geographical contexts, ownership and species composition). We screened for changes in the rate of expansion. The relationships between GS changes and some forest attributes (initial GS and GSD, recent forest area increase) were investigated. (2) Uncover the processes of GS changes and to split the GS expansion magnitude across dynamically-homogeneous forest ensembles. The study was based on GS flux estimation (growth, ingrowth, mortality and harvest). (3) Locate the actual GS expansion in a secular perspective. This analysis consisted in reconstructing the GS chronology since 1850. Levels of GS in 1892, 1908 and 1929 (associated to area of ancient statistics) were estimated using a conditional imputation approach for GSD estimation. Then, a holistic growing stock densification model was implemented to inquire the conditions required on densification patterns and magnitude to simulate the reconstituted GS chronology. *Results.* (1) Over 40 years, GS increases were three times faster than the areal ones, underlining the intensity of forest densification. No sign of saturation was found. Private forests, and mainly broadleaved ones, presented the greatest GS and GSD increases, suggesting the essential role of natural expansion and agricultural land abandonment. Regression models revealed the positive effect of initial GS and of recent areal increases on GS expansion. (2) The analysis of GS expansion processes evidenced the low level of harvests in comparison to forest growth, and the contribution of recent forests to wood resource development. It led to identify 4 synthetic forest ensembles contributing to the expansion and of distinct dynamics, mainly composed of private forests. (3) GS suggested a very low mean GSD at the beginning of the period (25 m³/ha) and a GS increase by almost +300% between 1892 and 2010, underlying the importance of this expansion. A convex growth model was required to simulate historical forest densification, attesting of a significant inertia in wood resource reconstitution after the forest transition, interpreted based on a gradual decrease in harvest rates for which indices were collected, or to a gradual recovery of site fertility. The analysis also suggested a distinct kinetics for GS densification in plantation forests. *Conclusions.* These researches reveal the magnitude of GS expansion and the importance of its analysis across forest contexts. This ancient expansion does not present any current sign of saturation and constitute a persistent carbon sink which should not decrease in the next decades assuming similar contextual conditions. According to the process analysis of GS expansion, a significant fraction of the GS increases does not constitute readily available additional wood resources. Thus, future harvest intensification policies must be contextualized and evolving in time.

Keywords: forest expansion – forest transition – forest area – growing stock – volume – basal area – forest composition – forest management – land-use abandonment – plantations – harvest – national forest inventory