
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

ANNAIS 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

ANAIS 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

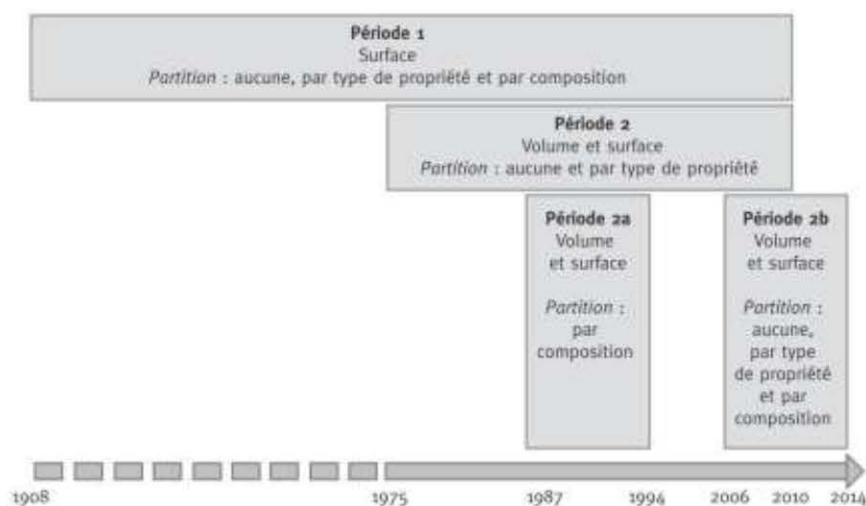
L'évolution séculaire des surfaces forestières entre 1908 et 2010 a pu être étudiée à la fois par type de composition et par type de propriété (période 1 ; figure 1, p. 323).

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.

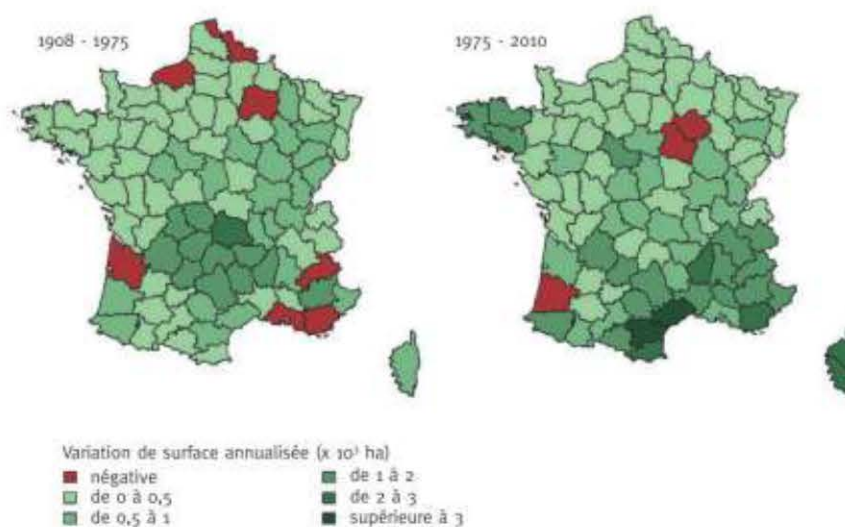


TABLEAU II Variations de surface en forêt de production par grande région écologique (GRECO) sur les périodes 1908-1975 et 1975-2010

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.

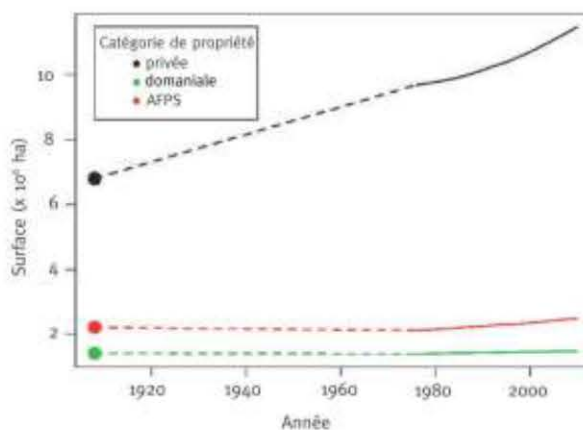
GRECO	1908-1975		1975-2010	
	Variation de surface (x 10 ³ ha)	I_s	Variation de surface (x 10 ³ ha)	I_s
Grand Ouest cristallin et océanique	97,5	1,2	176,4	2,5
Centre Nord semi-océanique	289,9	0,4	268,8	0,6
Grand Est semi-continentale	261,0	0,7	81,2	0,3
Vosges	68,4	0,5	39,8	0,4
Jura	143,6	1,2	51,7	0,5
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.

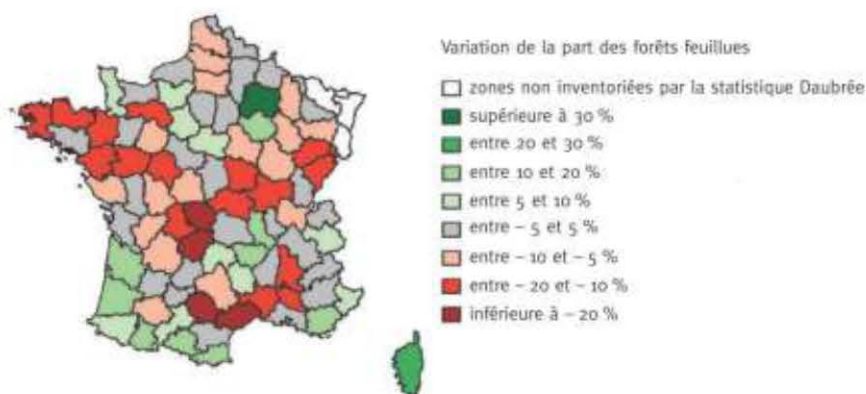
66 % en 1908 à 74 % en 2010. Les forêts domaniales présentent la plus faible augmentation sur cette période (+ 106 000 ha ; $I_5 = 0,2$).

• 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.

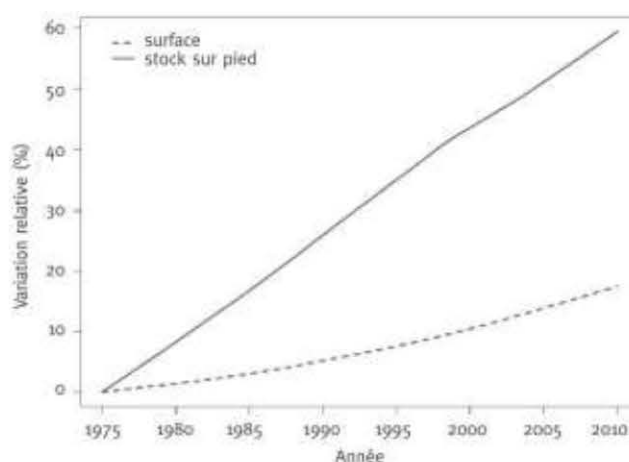
Évolution de la surface et du stock sur pied depuis 1975 (période 2)

• 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.

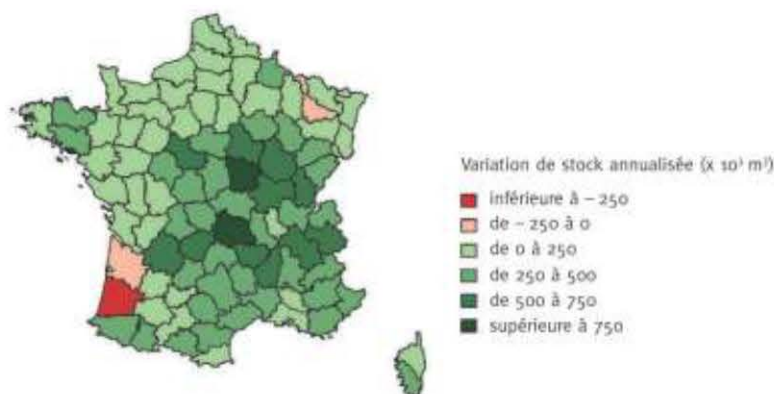
La résolution annuelle de la nouvelle méthode d'inventaire permet encore d'illustrer les tendances très récentes d'expansion de la forêt française (cf. encadré, p. 330). Sur la dernière décennie, la progression des surfaces dépasse les 100 000 ha/an, et celle du stock sur pied les 40 millions de m³ par 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

ANNAIS 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 %

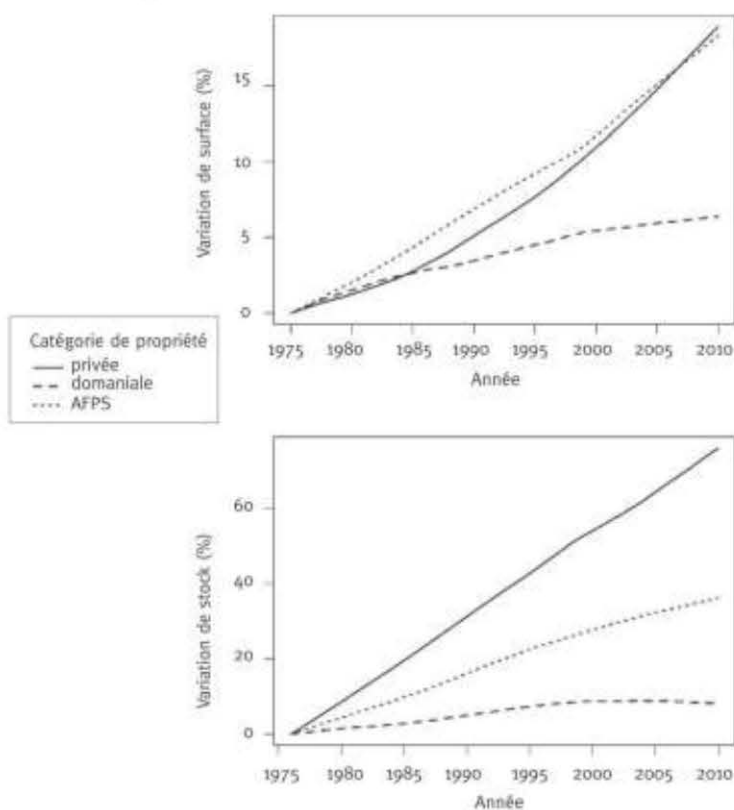
TABLEAU III Variations absolues et relatives de surface et de stock sur pied en forêt de production par catégorie de propriété (1975-2010)

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

ANAIS 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).

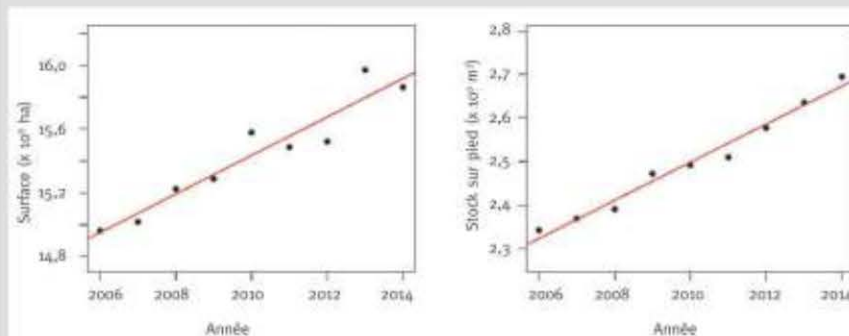
Les évolutions récentes de surface forestière et de stock sur pied

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.

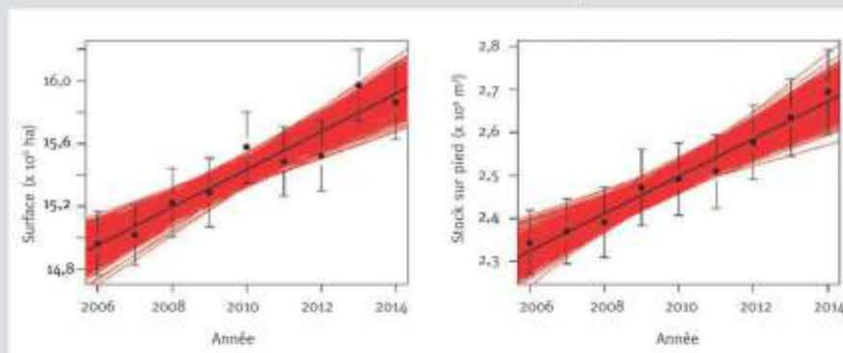


De 2006 à 2014, la surface forestière a ainsi augmenté à rythme moyen de 120 000 ha/an et le stock sur pied de 44 millions de m³/an.

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

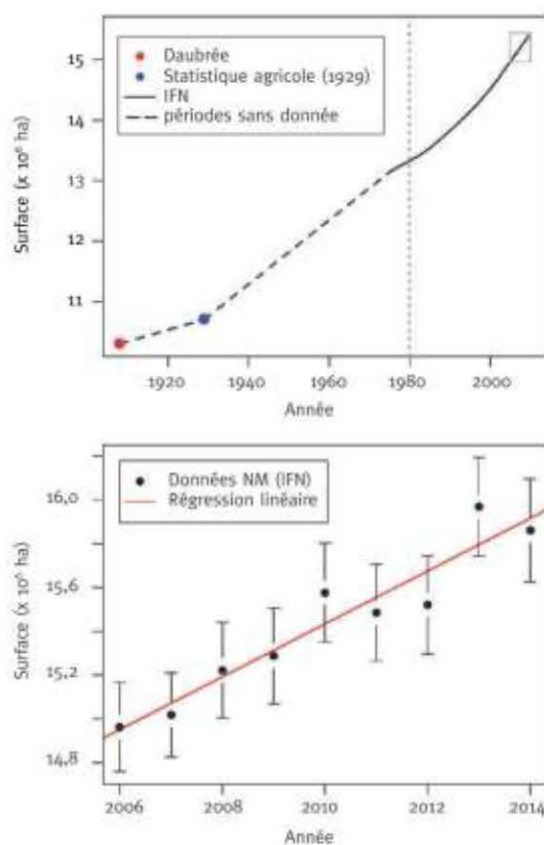
ANAIS DENARDOU - JEAN-CHRISTOPHE HÉRIVÉ - JEAN-LUC DUPOUEY ET AL.

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'accrues 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 (Rochel *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

ANAS 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. *Agriste 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.

III - Caractérisation de l'expansion des forêts françaises

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**).

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

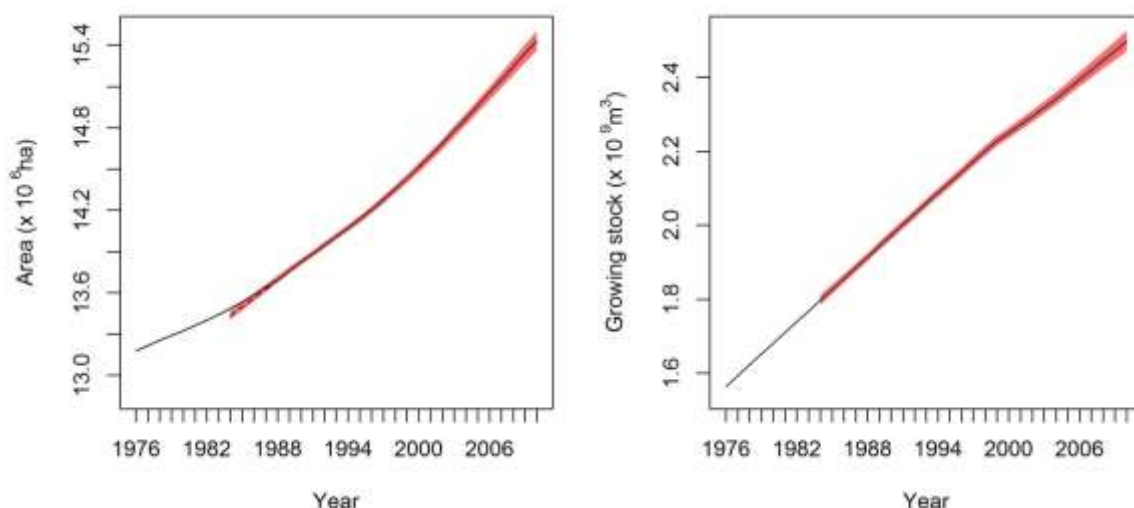


Fig.1 Absolute changes in forest area and volume of the growing stock in French forests. Volumes are defined at a cross-sectional diameter of 7 cm for production forests. The 95% bilateral confidence intervals were established from 10,000 bootstrap samples in the errors of national forest inventory estimates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

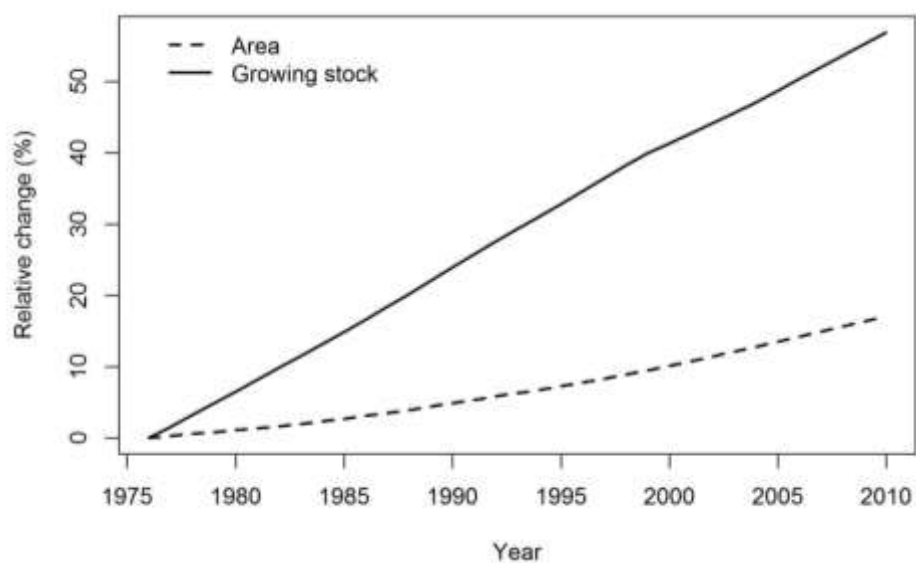
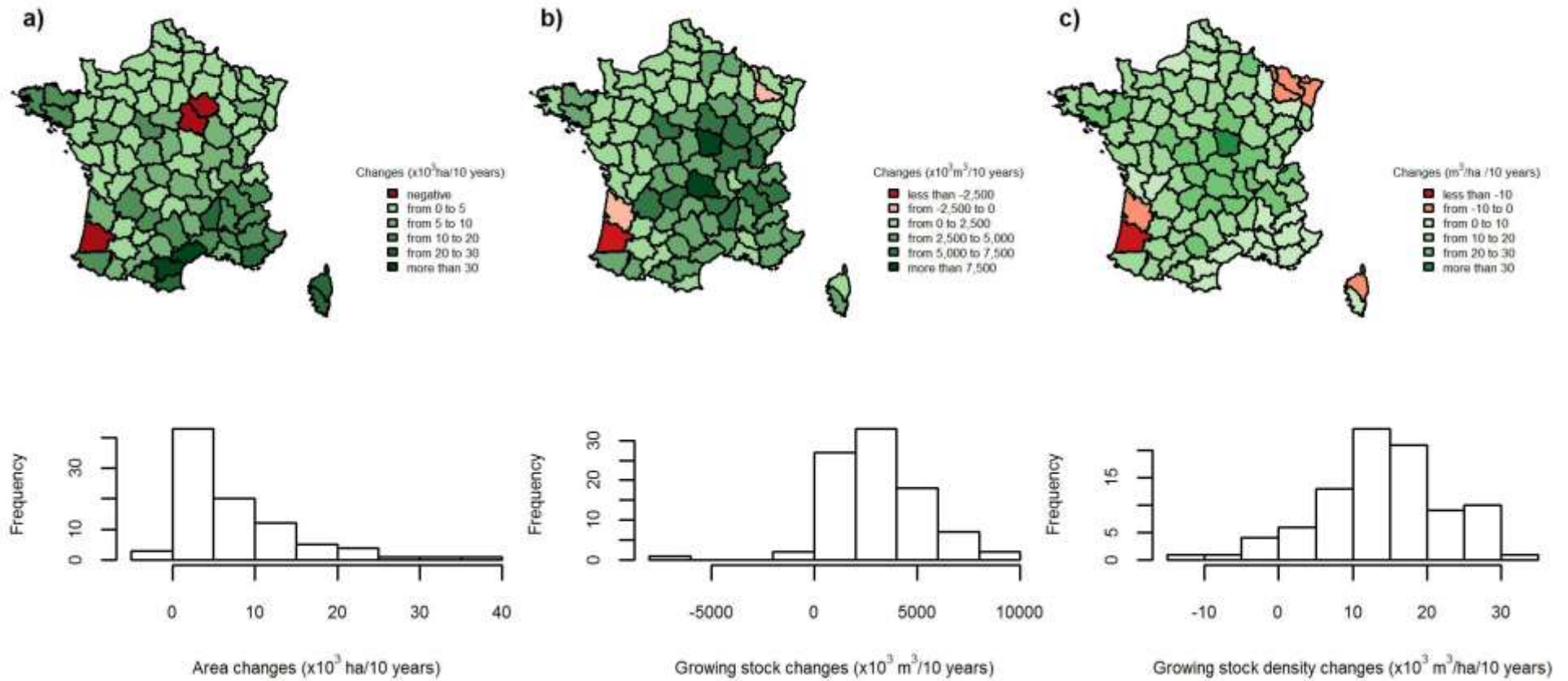


Fig.2 Relative changes in forest area and volume of the growing stock for French forests. Inventories in department administrative units were temporally interpolated and aggregated over the whole territory

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

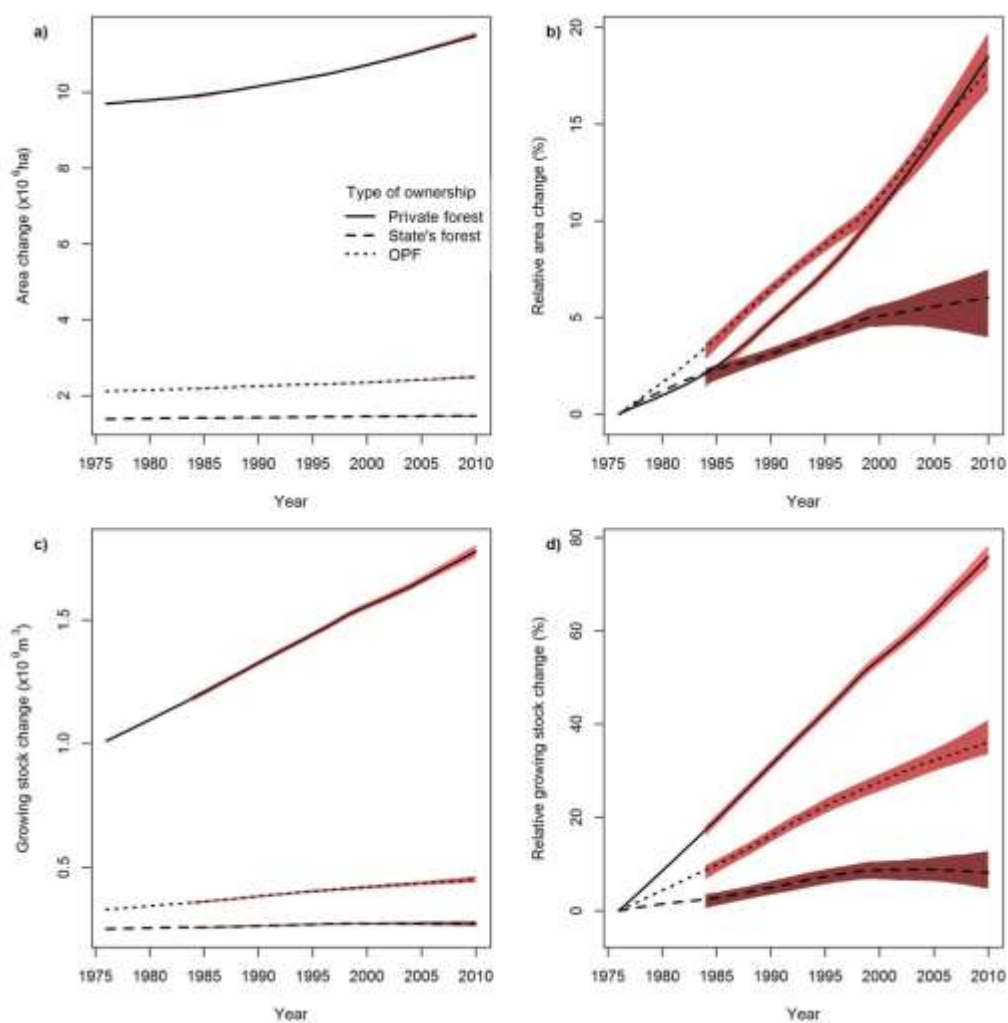
20

21

22

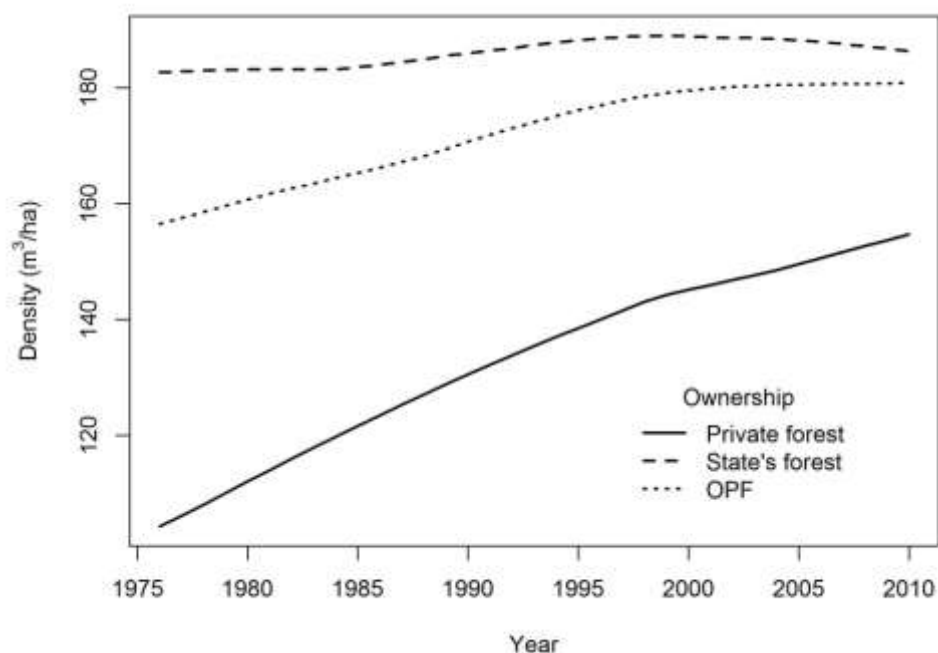
The R ratio indicates the contribution of ownership category to total expansion, with respect to their relative importance (see section 2.4). OPF refers to 'other public forests', essentially belonging to municipalities, and subjected to a legal management plan. ¹ part of the total expansion and R ratio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

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.

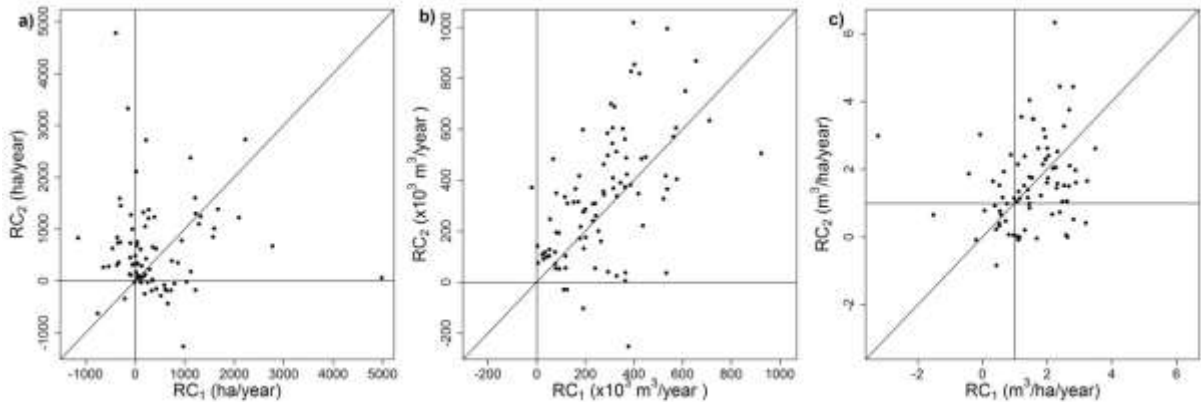


Fig.6 Cross-dau relationships between the rates of change in two successive subperiods between 1976 and 2010 (RC_1 and RC_2) for a) forest area, b) volume of the growing stock, and c) growing stock density. The separation year is 1985 for forest area and GSD, and 1990 for GS (see section 2.5). The black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

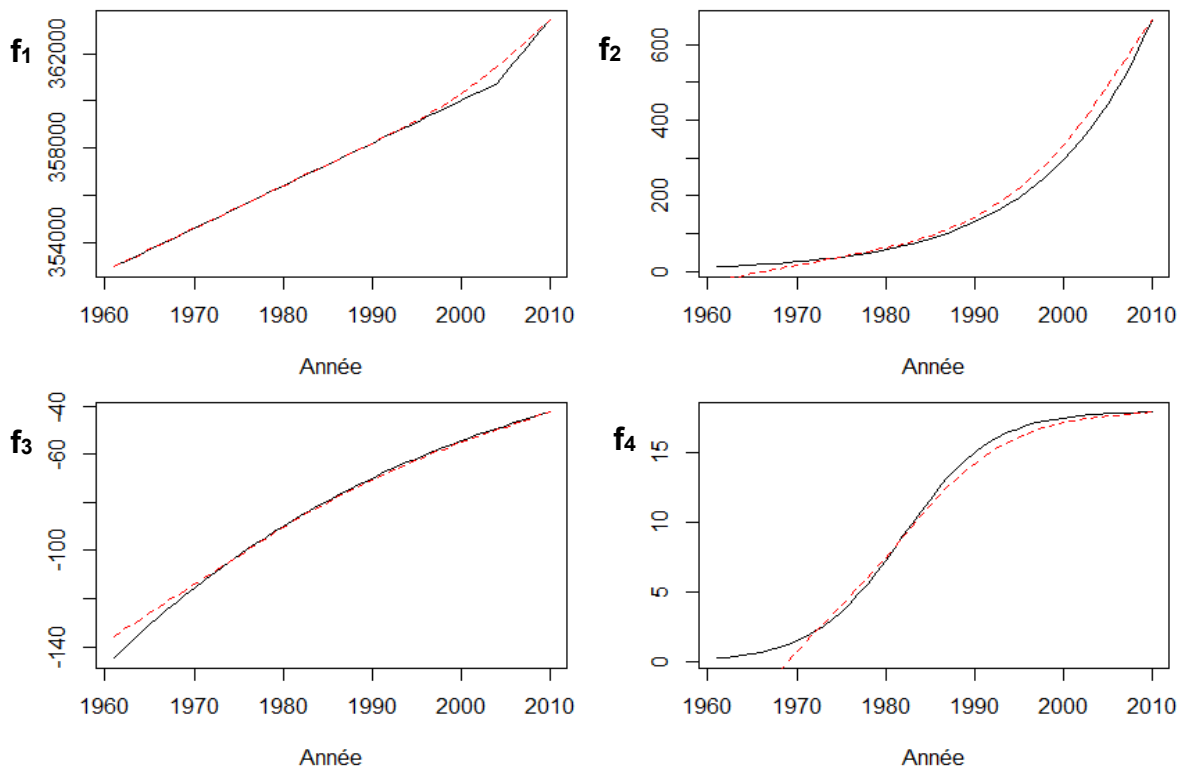


Figure 3.1. Courbes « exactes » (noir) et courbes interpolées (rouge) produites grâce à la méthode d'interpolation-extrapolation pour les 4 fonctions f₁, f₂, f₃ et f₄

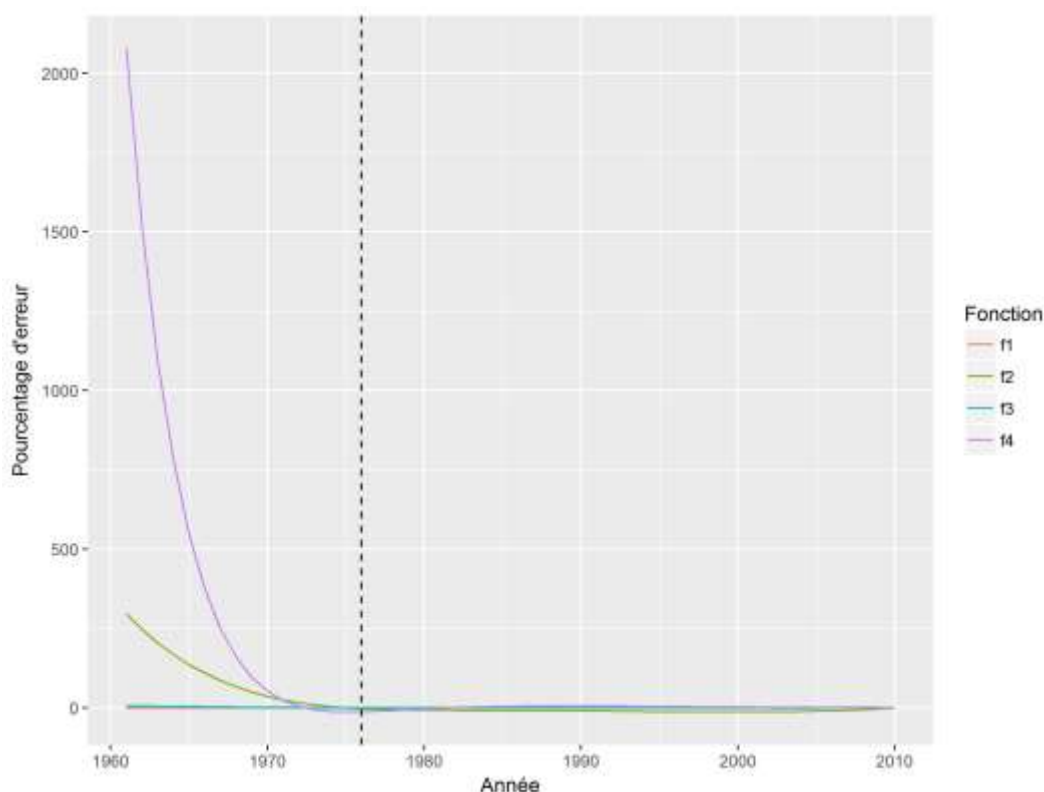


Figure 3.2. Pourcentage d’erreur calculé pour les quatre formules utilisées. La ligne verticale en pointillés représente l’année 1976

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

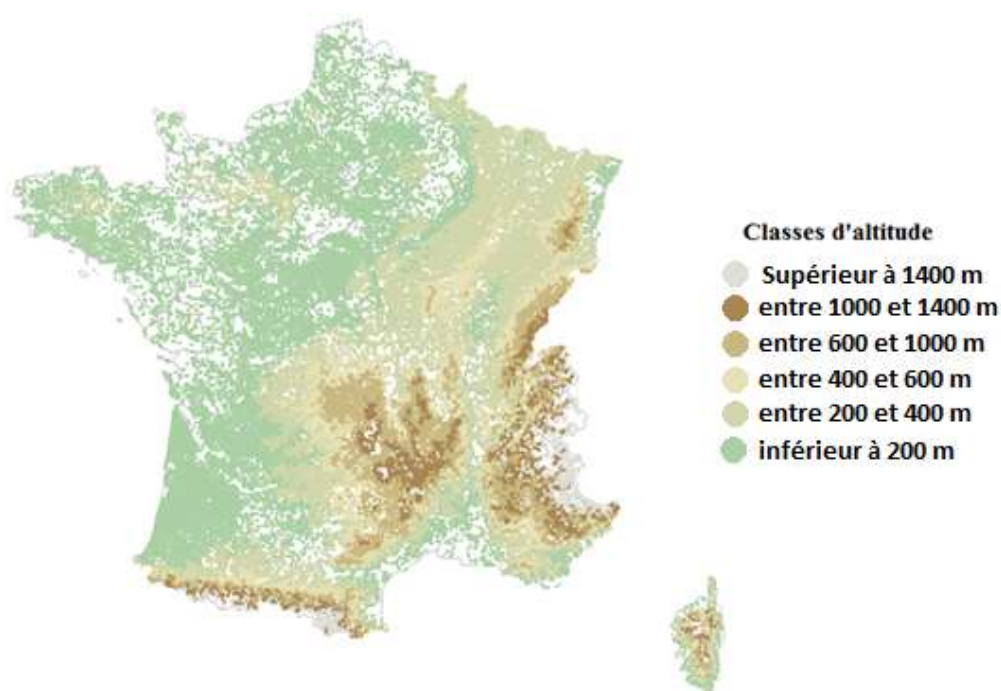


Figure 3.3. Localisation des points IFN en fonction de leur classe d'altitude

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**).

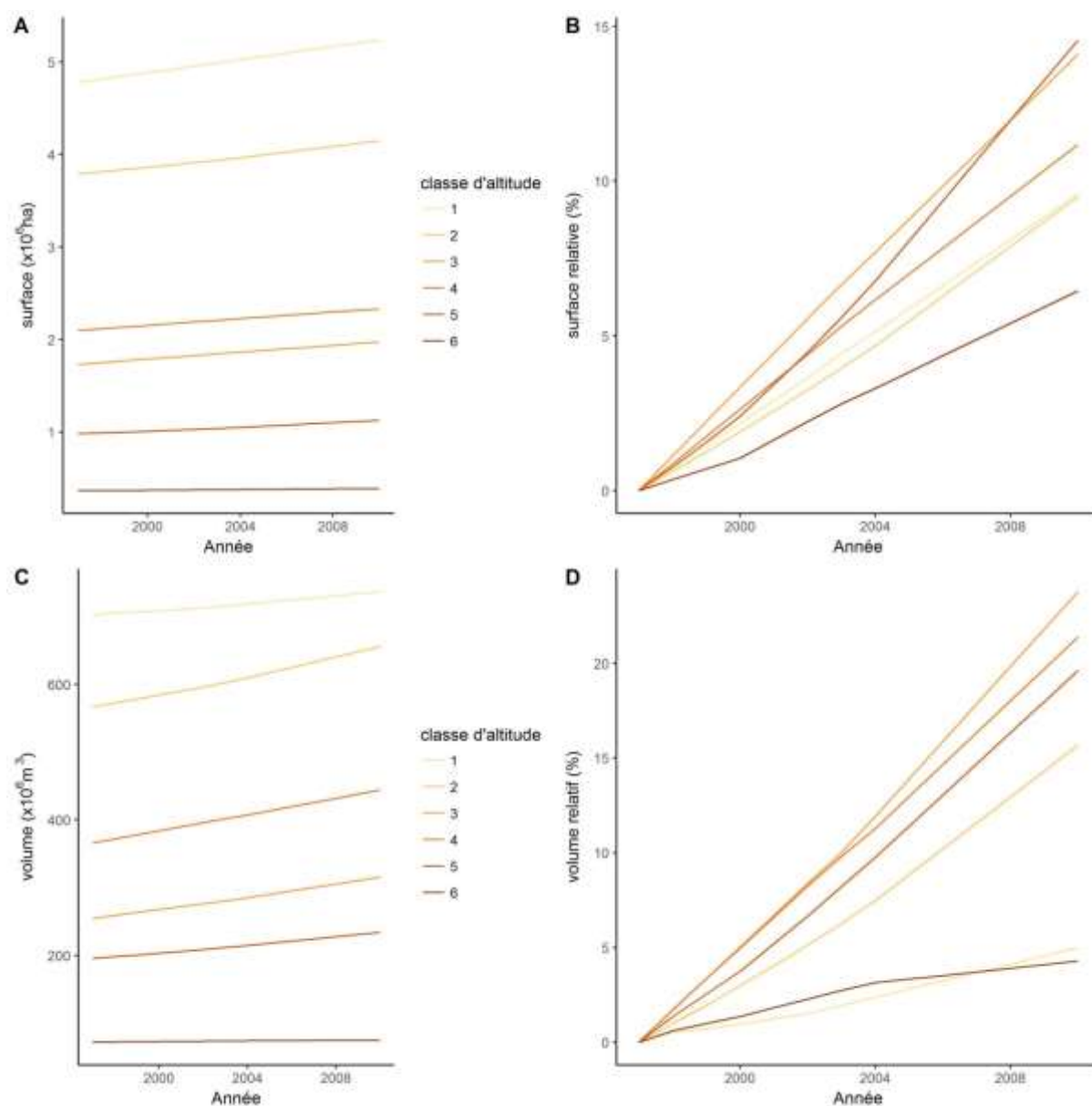


Figure 3.4. Changement de surface et de stock absolu et relatif des forêts par classe d'altitude entre 1997 et 2010

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.

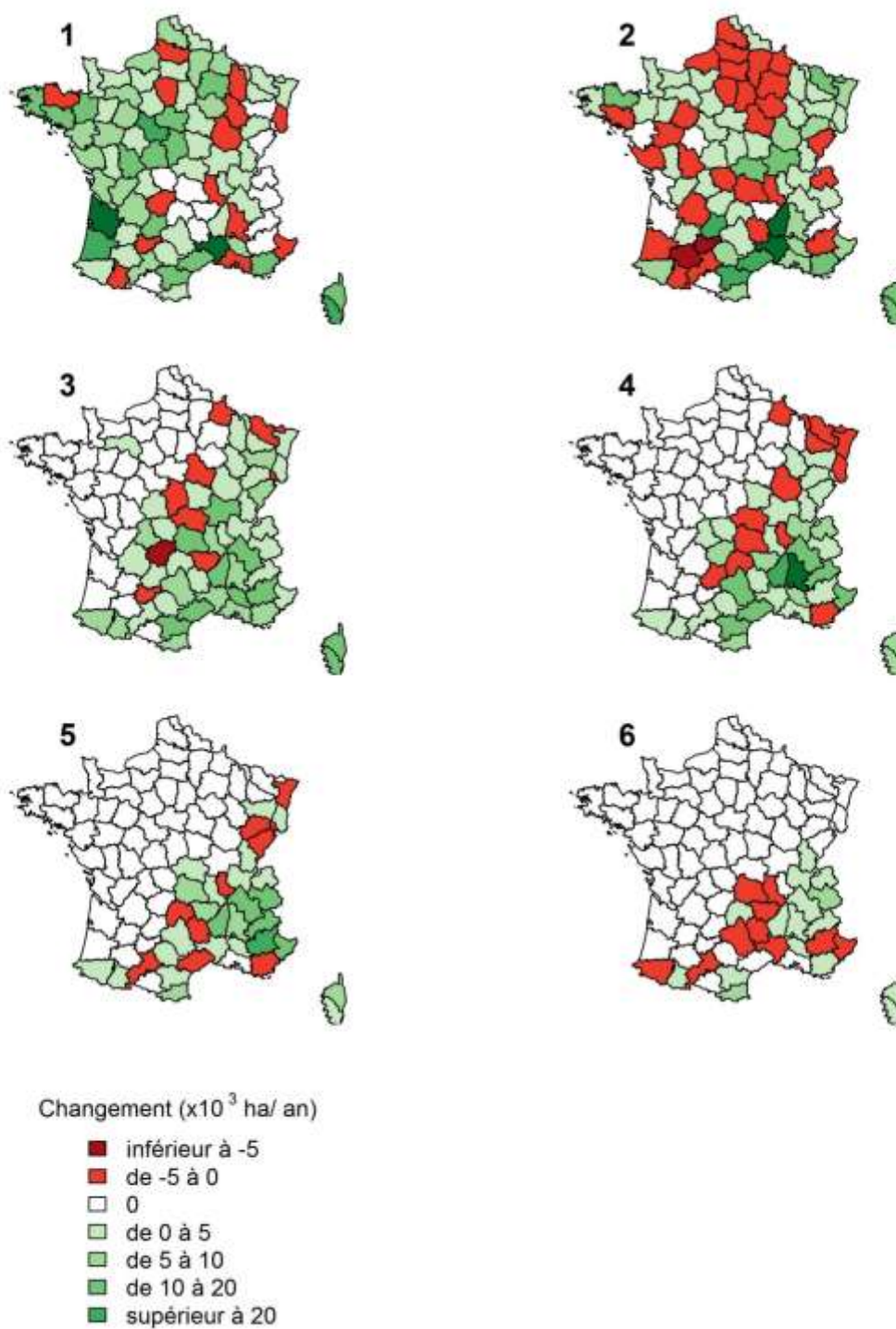


Figure 3.5. Variations de surface forestière par département en fonction de la classe d'altitude entre 1997 et 2010

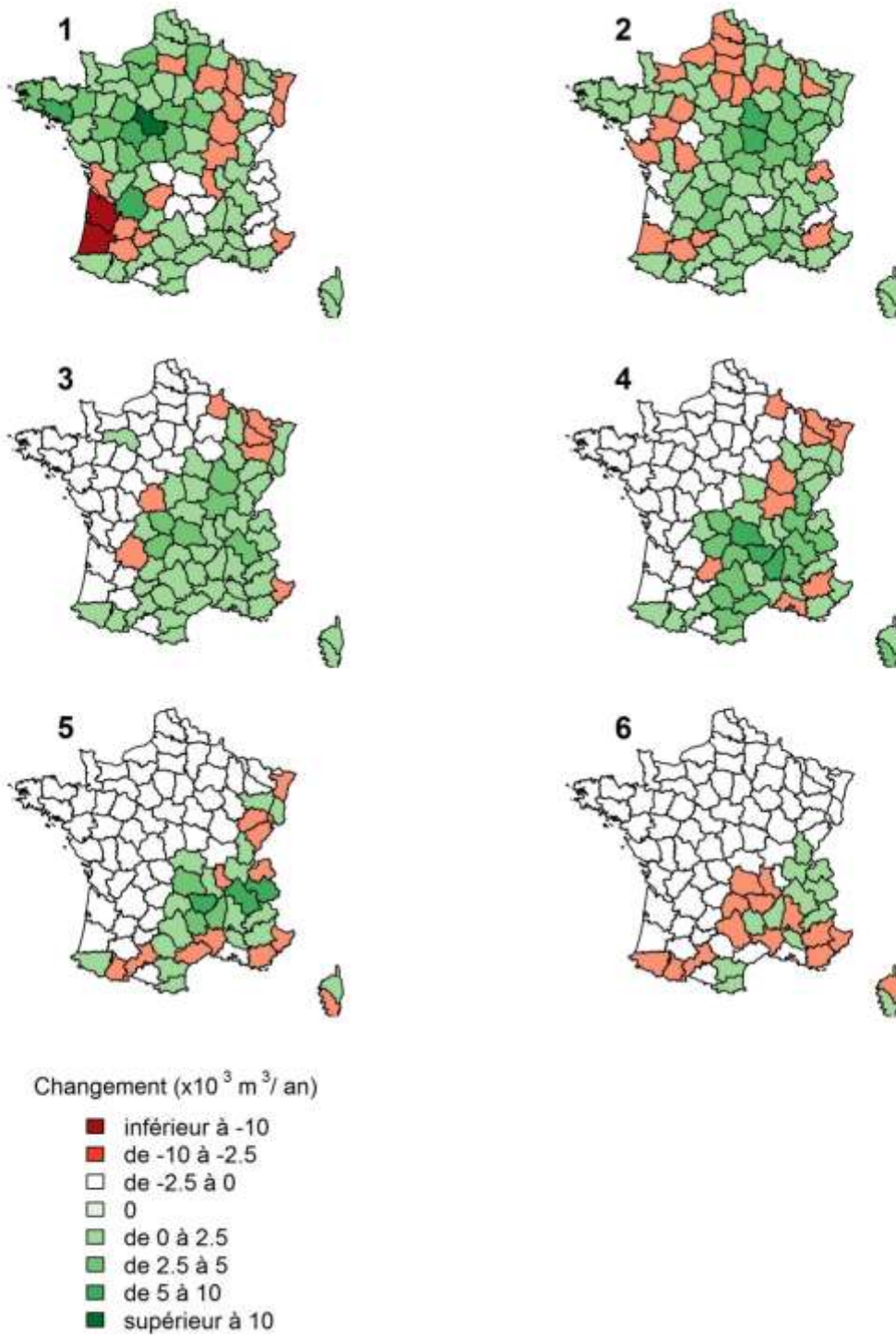


Figure 3.6. Variations du stock sur pied par département en fonction de la classe d'altitude entre 1997 et 2010

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.

