

1 Rappel du contexte et des objectifs

Les forêts françaises et de la plupart des pays développés connaissent une expansion de leur surface. Cependant, alors que l'augmentation de stock sur pied est encore plus rapide en Europe (UE-28) et en France et que l'expansion de surface a été fortement étudiée (Mather *et al.*, 1999), l'augmentation de stock sur pied n'a été que très peu analysée (Pignard, 2000). Or, l'expansion en stock est au cœur de nombreuses problématiques économiques, environnementales et politiques actuelles car elle est directement liée à la disponibilité en bois, à la biomasse et au stock de carbone. Il y a donc un véritable besoin d'étudier l'évolution passée du stock sur pied, d'en comprendre ses variations temporelles et spatiales afin de pouvoir, par la suite, en prédire son évolution future. **L'étude de l'évolution du stock sur pied constitue l'originalité de cette thèse.**

Nos travaux visent à comprendre la nature de ces changements de stock sur pied dans les forêts françaises. Ces forêts présentent i) une transition ancienne (localisée au début du XIX^{ème} siècle ; Mather *et al.*, 1999 ; Meyfroidt et Lambin, 2011) ii) les plus fortes augmentations de surface et de stock parmi tous les pays d'Europe (UE-28 ; +110 000 ha/an pour la surface et + 35 millions de mètres cubes par an pour le stock entre 2005 et 2015 ; Forest Europe, 2015), iii) des données de surface et de stock sur pied relativement anciennes (données IFN depuis 1961 et données anciennes de surface, depuis le XIX^{ème} siècle), et constituent donc un très bon cas d'étude.

Le premier objectif de cette thèse était d'étudier quantitativement et qualitativement les changements de surface depuis le début du XX^{ème} siècle et de stock depuis le début de la période IFN afin i) d'en caractériser les patrons de variation spatiale et temporelle, en les décomposant par types de propriété et de composition et d'ainsi approcher les causes de ces expansions, ii) de vérifier si des premiers signes de saturation sont détectables (des premiers signes de saturation de la biomasse forestière ayant été observés en Europe par Nabuurs *et al.*, 2013) et, iii) de lier les variations de surface terrière à l'état des forêts.

Le deuxième objectif était de chercher à approcher les causes dynamiques de l'expansion du stock de bois sur pied, et de pouvoir identifier et quantifier des composantes de l'expansion de ce stock en ventilant quantitativement son augmentation selon des systèmes forestiers dont la dynamique est homogène. Il s'agissait là de tenter une typologie de l'expansion.

Notre troisième objectif a été de tenter de situer l'expansion actuelle du stock de bois dans une dynamique de plus long terme, pour essayer d'en mesurer la constance temporelle ou le caractère transitoire. A cette fin, un premier sous-objectif a consisté à proposer des chronologies plausibles du stock sur pied depuis 1850. Un second sous-objectif a ensuite été de construire un modèle simple de l'accumulation du stock de bois dans les forêts, afin de

voir à quelles conditions sur la cinétique moyenne d'accumulation il est possible de restituer les chronologies historiques plausibles du stock de bois.

2 Approches méthodologiques

2.1 Les données

Dans le cadre d'une étude de la dynamique à grande échelle des forêts françaises, les données utilisées doivent à la fois i) décrire le territoire national de façon systématique ou à minima être représentatives de contextes significatifs, et ii) permettre une analyse temporelle sur le long terme, c'est-à-dire sur une période de temps allant de quelques décennies jusqu'à un horizon séculaire dans la mesure du possible.

La France a la chance de disposer d'un programme d'inventaire forestier depuis 1958, n'étant en cela précédée que par les pays nordiques (décennie 1920) ainsi que les Pays-Bas où la ressource forestière est la plus faible de l'Europe continentale (1938 ; Tomppo *et al.*, 2010). Si le premier inventaire départemental est daté de 1961 (Gironde), **il faut attendre 1980 pour disposer d'une première couverture complète de la forêt française (Figure 2.1, partie II), définissant un premier horizon d'analyse substantiel à une quarantaine d'années, qui a été mis à profit dans le chapitre III (1976 – 2015).**

La disponibilité de statistiques anciennes sur la forêt française (Audinot, 2016), mise en évidence dans le contexte du centenaire de la statistique Daubrée (Journée Daubrée, 2012¹¹), a formé une opportunité importante pour tenter d'étendre la perspective temporelle sur les évolutions mises en évidence et d'allonger notre période d'étude. Ces statistiques anciennes souffrent cependant de 2 défauts importants : 1) aucune définition n'est spécifiée concernant la surface forestière, ou sur la classification des surfaces en espèces dominantes (statistique Daubrée ; Daubrée, 1912) et plus généralement, aucun élément de protocole sur ces enquêtes n'est fourni, rendant l'appréciation de la pertinence de ces données difficile, 2) aucune donnée de stock de bois n'est fournie.

2.1.1 Les données IFN et le suivi de l'expansion forestière à la fois en surface et en stock sur pied

Les données de l'IFN se sont montrées être un très bon moyen de suivre la progression des forêts françaises en surface et en stock. Ces données ont l'avantage d'être issues d'un inventaire systématique de l'ensemble du territoire national métropolitain dont la méthodologie a peu varié dans le temps. Cependant, avant 2005, l'inventaire était départemental et une lecture nationale n'a pas été possible sans interpolation des données entre deux inventaires.

¹¹ <http://www2.agroparistech.fr/podcast/-Journee-Daubree-a-l-IGN-.html>

Nos résultats ont montré un intervalle de confiance étroit autour des chronologies de surface et de stock (voir article 2). La précision des données IFN anciennes était donc très satisfaisante, dans le cadre d'une étude à large échelle spatiale qui agrégeait l'ensemble des inventaires départementaux. Depuis 2005, cet intervalle de confiance a, cependant, tendance à s'élargir, du fait de la diminution du nombre de points d'inventaire (voir article 2).

De façon marquante, les chronologies d'évolution de la surface et du stock établies sur la période décrite par l'inventaire forestier (1976-2010 ; partie III ; articles 1 et 2) présentent des **tendances très constantes, sans variation de rythme, nous empêchant d'identifier la phase dans laquelle se trouve aujourd'hui l'expansion de la forêt française (i.e. phase primaire d'accélération de l'expansion, ou phase tardive de saturation)**, et soulignant le caractère encore restreint de cette période de 40 ans pour étudier des phénomènes forestiers aussi lents.

Les données IFN ont aussi l'avantage de présenter des informations dendrométriques nombreuses permettant une analyse de la dynamique des forêts à travers le calcul de flux. Une étude a permis de montrer une sous-estimation des prélèvements relevés en ancienne méthode (partie IV – 2.2), empêchant une utilisation de cette donnée sur l'ensemble de la période d'étude. Un bilan de flux a donc dû être utilisé afin d'estimer les prélèvements.

2.1.2 Les statistiques anciennes, des informations sur les forêts au début du XX^{ème} siècle

Afin d'améliorer la compréhension de la dynamique forestière, et il a été nécessaire de l'étudier sur des temps longs de l'ordre du siècle (voir parties III et V). Les données des statistiques anciennes (statistiques agricoles et statistique Daubrée) ont permis de pallier, en partie, ce manque pour ce qui est des surfaces mais une reconstitution, effectuée grâce aux données de l'inventaire national, a été indispensable pour le stock sur pied.

Trois jeux de données anciens, apportant une description de la forêt à une échelle plus fine que le grain national (i.e. au grain départemental), ont été utilisés : la statistique Daubrée de 1908 (Daubrée, 1912) et les statistiques agricoles de 1892 et 1929 (ministère de l'agriculture, 1897 et 1936). Ces données anciennes permettent d'avoir une image de la forêt à la fin du XIX^{ème} et au début du XX^{ème} siècle, c'est-à-dire près de 100 ans après la période supposée du « minimum forestier ». Cependant, ces données présentent certains inconvénients non négligeables :

- Les limites du territoire français ont évolué avec le temps. Les statistiques de 1892 et 1908 ne présentent aucune donnée sur l'Alsace-Moselle, annexée à cette époque. Il a donc été nécessaire de trouver d'autres sources de données (Huffel, 1920 ; Ministerium Für Elsaß-Lothringen, 1909, décrivant les forêts d'Alsace-Moselle en 1908, c'est-à-dire à la même année que la description de la statistique Daubrée) afin de compléter ce manque. Cette compilation de données anciennes peut apporter de l'incertitude qui est cependant non mesurable vu que les protocoles ne sont que très

peu explicités et qu'aucune mesure d'erreur n'est donnée. De plus, dans ces autres sources, les surfaces forestières sont ventilées seulement par type de propriété. Aucune information sur la structure des peuplements ou leur composition n'est disponible.

- Très peu d'informations sont disponibles sur la manière dont ces données ont été collectées. Leur inter-comparaison a permis cependant de montrer une forte cohérence entre ces données, confirmant une certaine fiabilité de leurs résultats (Audinot, 2016). L'analyse a cependant montré une possible sous-estimation des taillis dans les données de la statistique Daubrée. A cette époque, les taillis sont en pleine conversion et il est possible que la quantité de taillis en cours de conversion ou même de futaies, ait été surestimée, et la quantité de taillis simples sous-estimée, afin de satisfaire aux directives nationales.
- La description de la forêt française reste très sommaire et aucune donnée sur le stock sur pied n'est disponible.

Les données anciennes ont fait l'objet d'une vérification systématique de leurs données, permettant de relever des erreurs liées à une mauvaise saisie des données au moment de leur compilation, des erreurs de calcul des totaux ou des erreurs de typographie (Audinot, 2016).

Afin de reconstituer les variations de surface depuis 1850, ces données ont été complétées par des estimations plus anciennes au niveau national (partie V).

2.1.3 Homogénéisation des données

L'assemblage de statistiques de différentes provenances ainsi que le changement de méthode de l'IFN a demandé un travail d'homogénéisation des données et d'inter-comparaison des données anciennes (1892, 1908 et 1929) afin de pouvoir les utiliser de façon adéquate. Cette inter-comparaison s'est basée sur l'analyse des changements de définition de la forêt dans le protocole IFN (changement de méthode en 2005) mais aussi sur la concordance des ventilations utilisées par les différentes statistiques en ce qui concerne le type de propriété (**Tableau 2.3**) et les régimes forestiers (**Tableau 2.4**). Cela a conduit, parfois, à restreindre la période d'étude (exemple de l'étude par type de composition sur la période IFN ; articles 1 et 2).

Le manque d'information sur le protocole utilisé en 1908 pour ventiler les surfaces par composition nous a entraîné à utiliser des catégories très agrégées (feuillus/résineux) pour comparer les données de la statistique Daubrée à celles de l'inventaire forestier national.

Le changement de méthode IFN en 2005 s'accompagne d'un changement dans la définition de la forêt utilisée et dans la façon de relever certaines données (voir partie II – 2.1). Il a donc été indispensable d'étudier en profondeur ces changements afin d'utiliser de façon adéquate les données. Un biais dans l'estimation des surfaces, lié au changement de méthode, a été observé (voir partie II – 3.2), empêchant l'étude des changements de vitesse d'extension de la forêt entre les deux méthodes (article 2).

2.2 Facteurs de partitionnement de la forêt

La transition forestière est un phénomène qui a été dans un premier temps étudié au niveau national (Mather, 1992 ; Mather *et al.*, 1999 ; Rudel *et al.*, 2005). Nous avons donc voulu voir s'il existait des variations de son intensité au sein du pays afin d'approcher l'effet de la gestion et du milieu sur cette expansion.

La forêt française est très hétérogène du point de vue de sa composition et de sa structure verticale (taillis, futaie,...). Elle compte 13 des 14 grands types forestiers décrits en Europe par Barbati *et al.* (2014) et présente 90 espèces identifiées par l'IFN (voir partie II – 2.1). Cette diversité traduit une diversité de milieux (montagne, plaine, *etc.*) et de gestions (plantations, conversions des taillis-sous-futaie, *etc.*). Il était donc important de la prendre en compte dans notre étude afin de contextualiser l'expansion forestière. Pour cela, **il a été décidé de travailler à partir de strates à priori homogènes et stables dans le temps.** Plusieurs facteurs de partition ont donc été utilisés (département/GRECO, propriété et composition).

Notre étude est une étude au niveau national, il était donc important que le nombre de strates formées par les différents niveaux de partition ne soit pas trop important afin de permettre l'intelligibilité des résultats. Ainsi, nos facteurs de partition ne devaient pas être trop nombreux et devaient pouvoir facilement s'appliquer à l'ensemble du territoire.

2.2.1 Variations spatiales (interdépartementales/ou inter-GRECO)

Pour étudier les variations spatiales et biogéographiques de l'expansion, une partition par GRECO, représentant des zones homogènes d'un point de vue écologique (IFN, 2011a), a été utilisée et, vu que l'inventaire ancienne méthode (AM) est départemental, cette partition a demandé à rattacher les départements à une approximation de la partition des GRECO.

Les changements de surface et de volume forestiers observés par département ou GRECO ont pu être rapprochés d'informations sur des politiques de plantation, de changement d'occupation du sol, de contraintes de milieu ou de tempêtes afin d'en comprendre l'origine (ex : plantations du FFN dans le Massif Central, tempête de 1999 et 2009, *etc.*).

2.2.2 Type de propriété et information d'intensité de gestion

Trois types de propriétés ont été distingués : forêt domaniale, autres forêts publiques soumises au régime forestier (essentiellement communales) et forêt privée. Ce découpage différencie les forêts publiques soumises des forêts privées (regroupant forêts privées et forêts publiques non soumises) et, au sein des forêts soumises, les forêts domaniales et les autres forêts publiques soumises. Cette différenciation entre les deux types de forêts soumises est particulièrement importante car nous avons observé que leur dynamique est assez différente (**Figure 4.26**) et que les forêts communales ont une dynamique souvent plus proche de celle des forêts privées que des forêts domaniales (articles 1 et 2 ; **Annexes IV.10 et IV.11**). **Ainsi, il semble que les forêts communales, bien que soumises au régime forestier, aient une**

histoire et une gestion plus similaire à celle des forêts privées gérées qu'à celle des forêts domaniales.

Ce facteur permet ainsi une séparation par intensité de gestion. En effet, seuls 27% de la surface des forêts privées sont couverts par un plan de gestion (de Galbert *et al.*, 2015). Cependant, pour améliorer notre partition, il aurait été utile de pouvoir différencier les forêts privées soumises à un plan simple de gestion (PSG) de celles non soumises. Une étude sur un période courte et très récente (2008-2013) a montré que l'expansion en stock sur pied était plus rapide dans les forêts privées sans PSG que dans celles avec (+11% contre +4% ; IGN, 2018), montrant la véritable nécessité de les différencier.

Cette séparation entre forêts privées avec ou sans PSG aurait pu être opérée sur l'ensemble de la période d'étude d'inventaire car i) le PSG a été institué en 1963 (Morin, 2010 ; Bazire et Gadant, 1991), période à laquelle le programme d'inventaire se mettait en route, et ii) bien que la carte des forêts avec ou sans PSG ne soit disponible que depuis récemment, son croisement avec les données d'inventaire historiques devient possible dès lors qu'on dispose de coordonnées géographiques pour les points d'inventaire de l'IFN (à partir de 1983). **Le croisement entre type de propriété, type de composition et localisation des forêts (département/GRECO) a cependant permis de séparer des forêts privées, à priori fortement gérées (e.g. les forêts privées de pin maritime du Sud-Ouest et les forêts du quart Nord-Est) de celles, à priori, moins ou non gérées.**

Le découpage par type de propriété n'est pas véritablement stable dans le temps. En effet, des changements de propriété ont pu être opérés au cours de notre période d'étude. Il s'agit, par exemple, de forêts communales qui ont été soumises au régime forestier ou d'acquisitions par l'Etat de certaines forêts. Ces acquisitions sont décrites par de Galbert *et al.* (2015). Ce transfert au niveau du type de propriété peut engendrer de « fausses » variations qui ne correspondent pas à une véritable diminution ou augmentation de surface ou de stock. Cela a pu être observé lors de nos calculs de flux de surface terrière où les prélèvements étaient régulièrement négatifs dans les forêts communales, traduisant probablement une surestimation de la surface terrière à la fin de notre période d'étude, due à l'apport de nouvelles surfaces par soumission de forêts communales pendant la période d'étude.

2.2.3 Type de composition et problème au niveau de l'homogénéisation des données

Le découpage par type de composition permet d'approcher l'effet de certains choix de gestion et de politiques de plantation mais aussi de l'altitude, dans le cas des forêts montagnardes, et vient compléter les informations apportées par la géographie et le type de propriété.

2.2.3.1 Etude qualitative et quantitative de l'expansion (partie III) et restriction de la période d'étude pour la partition prenant en compte les compositions

Notre étude des changements de surface et de stock des forêts françaises par type de composition a été très restreinte dans le temps pour deux raisons :

- Le changement de méthode de l'IFN a entraîné un changement dans la mesure du couvert relatif des essences, et donc de la composition. Il a donc été choisi, dans un premier temps, d'étudier les changements de surface et de stock par composition en utilisant seulement les données AM.
- Au début de notre étude, les premiers cycles d'inventaire n'étaient pas disponibles de façon directe. A cause de cela, les informations sur la composition de ces inventaires n'ont pas pu être utilisées, obligeant à commencer nos études à ce grain en 1987 (contre 1976 pour les autres partitions).

La période d'étude résultante est très courte (1987-1994 contre 1976-2010 pour les autres partitions) alors que **l'expansion est un phénomène qui doit être étudié sur le long terme pour ne pas être masquée par des variations temporaires**. Les variations observées sur cette période ont cependant pu être comparées à celles observées sur la NM (2006-2014 ; voir article 2), permettant ainsi d'allonger la période d'étude.

Depuis peu, des données des inventaires plus anciens ont été mises à notre disposition. En utilisant ces données, il serait possible de récupérer 7 ans d'analyses et d'étudier les changements de surface et de volume par type de composition depuis 1980.

2.2.3.2 Etude de la dynamique (partie IV) et utilisation de la donnée de l'essence de l'arbre

La donnée de composition existante en nouvelle méthode (NM) n'a pas pu être recréée en ancienne méthode, malgré l'utilisation de la variable IMPESS (voir partie IV - 2.1). Il a donc été décidé d'analyser les flux au niveau des essences d'arbres et non de la composition du peuplement (voir partie IV – 3.4). Ce découpage permet une analyse plus approfondie que le simple découpage feuillus/résineux. Cependant, il est lié à l'arbre et non plus au point d'inventaire (et ne correspond donc pas à des ensembles forestiers au sens physique mais à des stocks de bois) et ne permet donc pas une analyse des surfaces.

La reconstitution des compositions (identifiées à partir des taux de couvert libre relatifs - TCLR ; voir partie IV – 2.1) à partir des surfaces terrières relatives des point a été envisagée. Cette méthode, basée sur la donnée de niveau arbre, a l'avantage de permettre une homogénéité entre les deux méthodes de l'IFN. Cependant, la donnée liée à l'arbre est relevée sur une placette de 15 m alors que la donnée de TCLR (donnée décrivant le peuplement) est relevée sur une placette de 25 m (voir partie II – 2.1). Ainsi, **la donnée de peuplement est plus à même de prendre en compte la diversité forestière**.

2.2.3.3 Données de composition de la statistique Daubrée

La donnée de composition de la statistique Daubrée consiste en une liste d'espèces ou groupes d'espèces. **Aucune information n'est apportée sur la façon dont cette donnée a été relevée**. Sachant que la part actuelle des mélanges dans la forêt française est très conséquente (Morneau *et al.*, 2008), on peut penser que l'essence indiquée correspond à l'essence dominante des forêts mais il est impossible de savoir s'il s'agit d'une essence objectif au sens

de l'aménagement forestier (lorsqu'il s'agit par exemple de forêts publiques), ou de l'essence principale du point de vue du volume, du taux de couvert ou même de la production. Nous avons donc préféré étudier l'information de composition en la séparant en deux modalités simples (feuillus et résineux) et ainsi d'engendrer le moins de biais possible.

2.2.4 Autres critères de partition envisagés

D'autres critères de partition ont été envisagés comme l'altitude, la structure du peuplement et la classe de diamètre des arbres.

2.2.4.1 Critère d'altitude

Celui de l'altitude aurait pu venir en complément de la géographie et du type de composition afin de mieux circonscrire le phénomène de déprise agricole, surtout dans les milieux montagnards, mais **la donnée d'altitude n'était pas disponible pour l'ensemble des inventaires AM ne permettant qu'une analyse très restreinte dans le temps** (1997-2010 ; voir partie III – 4.2) et ne prenant pas en compte l'ensemble des départements français. Une première analyse très réduite prenant en compte ce facteur a été effectuée et a permis de montrer que les plus fortes intensités d'expansion en surface et en stock sont observées dans les milieux de moyenne altitude (entre 400 et 1400 m ; voir partie III – 4.2). Il serait peut-être possible, en récupérant la localisation des points d'inventaires plus anciens, d'étendre cette étude à l'ensemble de la France et à une période de temps plus longue.

2.2.4.2 Critère de structure forestière verticale

Le critère de structure forestière verticale figure naturellement parmi les facteurs de stratification auxquels on peut songer, puisqu'il peut permettre une identification plus précise des systèmes de production forestiers (notamment peuplements équiennes, ou taillis et taillis-sous-futaie), permettant par exemple de distinguer plus sûrement les systèmes de production sous-jacents aux groupes de faciès forestiers de feuillus sociaux de plaine et moyenne montagne (2/5 de l'expansion ; **Figure 4.41** ; **Figure 4.43**) et ceux des forêts privées gérées (1/5 de l'expansion). **Il n'a cependant pas été retenu dans la mesure où, dans un contexte d'expansion, la structure forestière elle-même est appelée à changer au cours du temps**, conduisant à une non-indépendance des strates de la forêt, et à la possibilité de glissement de fractions du stock de bois entre strates (voir cas déjà soupçonné d'un glissement de la forêt privée vers la forêt communale, section partie IV – 3.3). **De façon essentielle, les facteurs de stratification de la forêt doivent présenter un caractère le plus stable possible au cours du temps**. Par ailleurs, cette notion reste ambiguë, puisque peuvent être confondues la structure verticale du peuplement constatée à un instant donné, et le mode de gestion des peuplements. Ainsi une structure de taillis peut être traitée en futaie régulière (cas emblématique des conversions).

En revanche, la structure a été utilisée afin d'estimer les stocks anciens à partir des statistiques forestières et agricoles, et elle a joué un rôle essentiel pour ces estimations (**Figure 4.45**).

Dans cette situation en effet, on exploite un attribut des peuplements présentant une structure donnée à un instant donné, sans se préoccuper de sa dynamique temporelle.

2.3 La méthode d'interpolation-extrapolation, indispensable pour une lecture continue de l'évolution de la surface et du stock sur pied

Les données ancienne méthode étant départementales et non synchronisées dans le temps (partie II – 2.1 ; **Figure 2.1**), une lecture annuelle au niveau national de l'expansion n'a pu être effectuée qu'en interpolant les données entre les inventaires successifs. Cette méthode entraîne forcément une forme d'approximation dans les estimations. Son effet a été analysé (voir partie III - 4.1) et montre que l'utilisation d'une méthode d'interpolation-extrapolation peut entraîner un lissage des tendances ainsi qu'un biais au niveau de l'origine entre la courbe réelle et celle obtenue par interpolation (**Figures 3.1 et 3.2**). Ce biais est principalement dû à l'extrapolation au début de la période. C'est pourquoi, **nous avons choisi une approche conservative où les estimations sont amorcées à la date où 80% des départements avaient déjà été inventoriés au moins une fois, diminuant ainsi l'imprécision.**

La chronologie de surfaces a été créée à partir de différents seuils de pourcentage de départements déjà inventoriés (2, 30, 50, 80 et 100%) et montre un biais très faible (**Figure 6.1**). L'écart relatif entre la chronologie par interpolation-extrapolation entre 1961 et 1980 et l'interpolation entre la surface en 1908 (données de la statistique Daubrée corrigée de la ForstStatistik allemande de 1908) et celle en 1980 (donnée provenant de la chronologie par interpolation-extrapolation), date à laquelle 100% des départements français ont déjà un premier inventaire, a été calculée. Nos résultats montrent des écarts très faibles (maximum 0,22% ; **Figure 6.2**). **Notre choix d'un seuil à 80% est très prudent et une extension de la période d'étude pourrait être envisagée.**

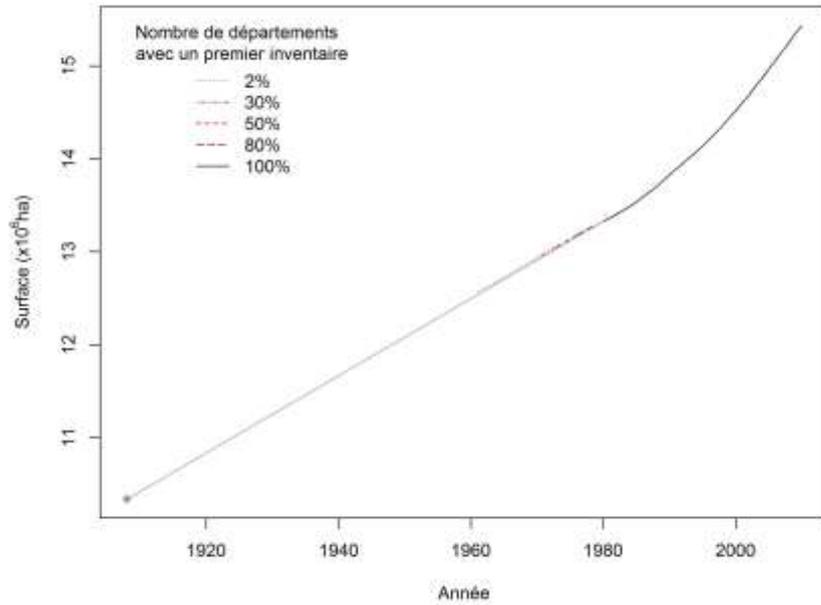


Figure 6.1. Chronologie de l'évolution des surfaces depuis 1908 (données de la statistique Daubrée Corrigée de la ForstStatistik allemande de 1908) selon la proportion de départements inventoriés au moins un fois utilisée comme seuil dans la reconstitution des surfaces IFN par interpolation-extrapolation. La ligne grise représente l'interpolation entre la surface en 1908 et la celle en 1980, date à laquelle 100% des départements français avaient été inventoriés au moins une fois.

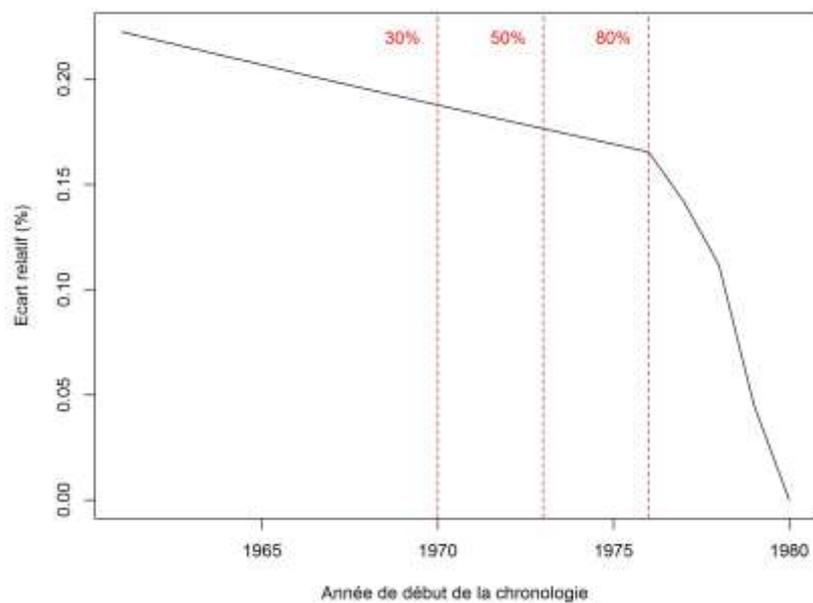


Figure 6.2. Ecart relatif entre la chronologie des surfaces entre 1961 et 1980 et l'interpolation entre la surface en 1908 et la celle en 1980 selon l'année choisie pour le début de la chronologie. Lignes rouges : seuils du nombre de départements inventoriés envisagés.

Le lissage de la courbe par l'interpolation pouvant empêcher la lecture des véritables tendances, il a été décidé que l'analyse des changements de rythme d'expansion (voir partie III) serait effectuée à partir des données brutes, sans interpolation.

Les problèmes liés à l'interpolation des données (*i.e.* lissage de la courbe et diminution de la période d'étude) sont liés à l'inventaire départemental non-synchrone (ancienne méthode). **La mise en place d'un inventaire forestier continu en 2005 (Robert *et al.*, 2010 ; Hervé *et al.*, 2014) a donc été d'une importance capitale pour l'étude future des dynamiques forestières à grande échelle.**

2.4 Calcul des flux et nécessité d'utiliser un bilan de surface terrière pour calculer les prélèvements

La donnée de prélèvement étant biaisée en ancienne méthode (voir partie IV – 2.2 ; **Annexe IV.3**), l'estimation du flux de prélèvement n'a pu être effectuée qu'à partir de l'utilisation indirecte d'un bilan de matière. **Ce bilan, effectué entre deux dates d'inventaire, ne repose pas sur les mêmes points d'inventaires, les placettes d'inventaire n'étant pas des placettes permanentes.** Il a donc été indispensable d'apporter le plus de précision possible dans les calculs des autres flux (croissance, recrutement et mortalité). Ainsi, une attention particulière a été apportée à l'estimation de la croissance radiale des arbres sur les années non couvertes par la donnée d'accroissement radial ainsi qu'à l'estimation de la mortalité sur la période non couverte par la donnée de mortalité relevée sur le terrain (les données relevées décrivent 5 à 10 ans alors que la période d'étude est en moyenne de 12,5 ans ; **Tableau 4.4**). Pour cela, **une méthode utilisant à la fois l'accroissement radial ou la mortalité relevée ainsi qu'une moyenne conditionnelle de ces flux sur le premier inventaire a été utilisée.**

Cependant, plusieurs approximations ont dû être effectuées et apportent de l'imprécision dans les estimations : approximation de l'accroissement radial sur la période totale (en moyenne 12,5 ans ; **Tableau 4.4**) des arbres à partir des IR5 et IR10 (**Figure 4.4**), approximation de l'épaisseur de l'écorce à partir d'un modèle et approximation de la circonférence à 1,30 m à partir des données de circonférence à 0,10 m pour les arbres morts (**Annexe IV.4**).

Plusieurs essais successifs de calcul des flux ont été effectués (**Tableau 6.1**). Ces essais prennent en compte ou non i) une utilisation des données à t1 (à partir d'une moyenne entre celle à t1 et celle à t2 ; partie IV – 3.2.1 et 3.2.2) pour calculer l'accroissement radial et la mortalité sur la période non couverte par la seule donnée à t2, ii) l'accroissement de l'écorce sur la période étudiée. Ils ont entraîné une diminution des prélèvements négatifs et mis en exergue l'importance de la précision de nos calculs afin d'obtenir des estimations de prélèvements les plus fiables possibles (**Annexe VI.1**).

	Utilisation d'une moyenne entre les données à t1 et celles à t2 pour le calcul de l'accroissement radial	Utilisation d'une moyenne entre les données à t1 et celles à t2 pour le calcul de la mortalité	Prise en compte de l'accroissement de l'épaisseur de l'écorce
Essai 1	Non	Non	Non
Essai 2	Oui	Non	Non
Essai 3	Oui	Oui	Oui

Tableau 6.1. Description des essais successifs d'augmentation de précision dans le calcul des flux

La comparaison entre les prélèvements calculés par la méthode du bilan et ceux relevés par l'IFN montre une forte corrélation, mais un facteur multiplicatif loin de l'unité (2,2 ; partie IV – 3.2.3 ; **Figure 4.5**) très proche de celui liant les prélèvements relevés par les protocoles en ancienne et nouvelle méthode (les prélèvements issus du protocole nouvelle méthode étant non biaisés ; les prélèvements calculés à partir du protocole nouvelle méthode sont 2,4 fois plus élevés que ceux calculés à partir du protocole ancienne méthode ; partie IV – 2.2 ; **Annexe IV.3**), confirmant ainsi la validité de nos calculs de prélèvement issus du bilan. Cependant, on observe la présence de prélèvements négatifs, impossibles. Ils sont principalement observés dans les forêts communales et les GRECO présentant une proportion importante de chênes verts (partie IV – 3.3 ; **Tableau 4.6**). Deux hypothèses expliquant ces aberrations ont été avancées : la soumission de forêts communales pendant notre période d'étude et la difficulté de la lecture des cernes du chêne vert.

2.5 Estimation des stocks anciens et modélisation de l'évolution du stock depuis 1850

Les statistiques anciennes ne présentant pas d'information de stock sur pied, celui-ci a été estimé à partir des données de l'IFN par une méthode d'imputation conditionnelle (voir partie V - 3). Un premier essai a été effectué en utilisant les moyennes conditionnelles des stocks à l'hectare selon différentes partitions (prenant en compte un ou plusieurs facteurs parmi le département, le type de propriété, la structure du peuplement et la composition en essence ; **Figure 4.45**). Les estimations associées des stocks anciens ont semblé être surestimées, au vu de la littérature qui décrit la forêt française au XIX^{ème} siècle comme appauvrie (Mather *et al.*, 1999 ; Husson et Degron, 1999 ; Degron, 1999) suite à une forte pression humaine sur les forêts, mettant en évidence la forte capitalisation générale des

forêts sur la période, mais aussi et surtout au vu de la chronologie de stock générée sur le long terme, qui semblait impossible. Ainsi, **d'autres estimations fondées sur les quantiles de 10 à 50% du stock observé en début de la période IFN (en moyenne en 1983) ont été réalisées, avec l'hypothèse centrale que – dans un contexte d'expansion du stock – même ces valeurs anciennes de densité de stock à l'hectare, observées dans les premiers inventaires de l'IFN, sont supérieures à la densité de stock qui prévalait au début du XX^{ème} siècle.** Cette approche a donné des résultats qui semblent plus cohérents graphiquement (**Figure 5.5**). Nos modèles présentent par ailleurs les courbes d'évolution des stocks au cours du XX^{ème} siècle les plus cohérentes avec les estimations du stock au début du XX^{ème} siècle utilisant les quantiles de 30 et 40% du stock de bois à l'hectare des inventaires IFN anciens, **suggérant qu'au niveau des variables conditionnelles fixées (département, propriété, structure), le phénomène d'expansion est général et rapide (+300% en 120 ans), et que les niveaux de capitalisation de la forêt d'il y a 100 ans sont plus faibles que ce que suggèrent des forêts semblables aujourd'hui.**

Trois types de modèles de densification ont été testés (chapitre V), permettant de tester trois hypothèses radicalement différentes d'accumulation moyenne de stock à l'hectare : concave saturant (modèle monomoléculaire ; **Figure 5.10**), linéaire (**Figure 5.11**), et convexe. Dans ce dernier cas, un modèle sigmoïde (modèle de Hossfeld à trois paramètres ; **Figure 5.12**) a tout de même été testé pour garantir une extrapolation éventuelle raisonnable du modèle, puisqu'il n'est pas possible que le stock à l'hectare augmente indéfiniment de façon accélérée (apparition d'un effet de densité-dépendance dans nos modèles linéaires de l'article 2). D'autres modèles auraient pu être envisagés comme, par exemple, un modèle convexe (de type modèle exponentiel positif) mais le modèle de Hossfeld a l'avantage de présenter une première partie, avant le point d'inflexion, qui présente une forme convexe et les différents temps au point d'inflexion testés ont permis d'étudier à la fois un modèle présentant seulement une dynamique convexe (lorsque le temps au point d'inflexion était supérieur à la durée de la période étudiée) et un modèle présentant une dynamique convexe puis concave (lorsque le temps au point d'inflexion était inférieur à la durée de la période étudiée).

3 Synthèse des résultats principaux

Dans cette partie, nous synthétisons les connaissances que nos études ont apportées sur la compréhension de l'expansion forestière en surface et, surtout, en stock sur pied.

3.1 Une expansion ancienne, plus forte en stock qu'en surface

La transition forestière française est datée du XIX^{ème} siècle (Mather, 1999 ; Meyfroidt et Lambin, 2011). Depuis, la surface forestière des forêts est en augmentation (Cinotti, 1996 ; Denardou *et al.*, 2017 ; **Figure 6.3**). **Sur 100 ans, la forêt française a vu sa surface augmenter de 50% (i.e. 5,1 millions d'hectares ; voir partie III).**

Une estimation du stock de bois à la fin du XIX^{ème} siècle - début du XX^{ème} siècle a permis d'estimer celui-ci à **environ 630 millions de m³ en 1892 et 940 millions de m³ en 1929 (voir chapitre IV ; Figure 6.3)**. Il aurait donc augmenté de façon largement plus soutenue que les surfaces forestières. **Alors que la surface forestière française a augmenté de 58% entre 1892 et 2010 (voir chapitre II), le stock sur pied aurait augmenté de 300% entre 1892 et 2010 (voir partie V), c'est-à-dire cinq fois plus vite.** Ces rythmes relatifs d'expansion en surface et en stock sont très proches de ceux estimés en Suisse entre 1860 et 2006 (+292% pour le stock de bois et +63% pour la surface forestière entre 1860 et 2006 ; Usbeck *et al.*, 2010).

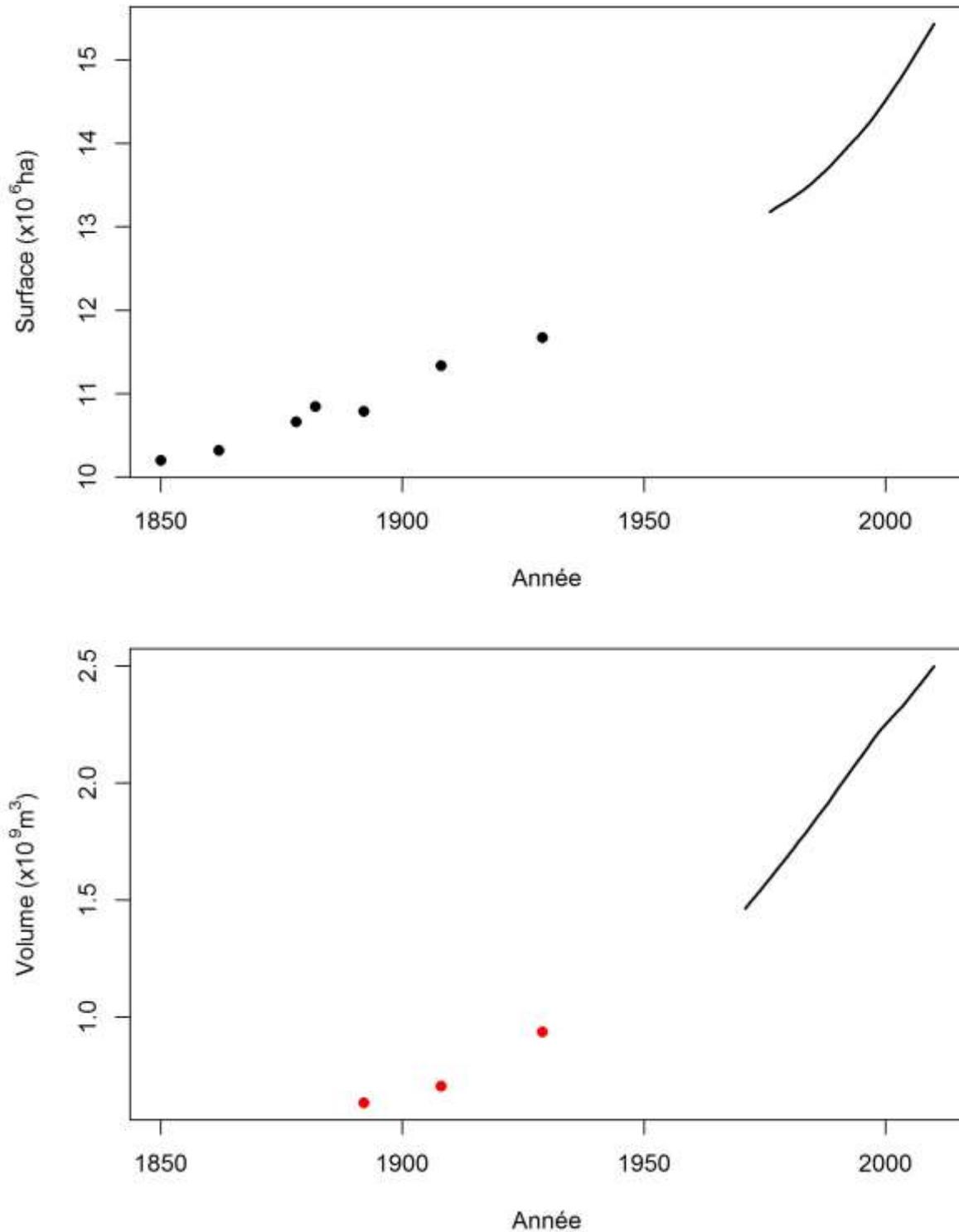


Figure 6.3. Evolution de la surface et du stock sur pied des forêts françaises depuis 1850. La ligne représente les résultats de l'interpolation des données IFN entre 1976 et 2010. Les points noirs sont des données provenant de statistiques anciennes (voir partie V – 3.2.1). Les points rouges sont les estimations du stock en 1892, 1908 et 1929.

La forêt française était vraisemblablement peu capitalisée en 1850 (25 m³/ha) et au début du XX^{ème} siècle (65 m³/ha en 1892). Ce dernier chiffre correspond à la densité des taillis actuels (66 m³/ha en 2010 ; données IFN). Elle a vu sa densité augmenter fortement entre 1892 et 2010 (+ 97 m³/ha ; voir partie V – 3.4.2). La densité du stock de bois français (170 m³/ha en 2015 ; données IFN) reste cependant faible comparée à celle d'autres pays européens, comme l'Allemagne (320,8 m³/ha en 2015 ; Forest Europe, 2015 ; **Figure 6.4**). Il est souvent avancé que cette faiblesse relative du stock serait due au fait que la France contient une part importante de forêts méditerranéennes et de haute montagne, à faible niveau de stock moyen. Et c'est bien ce que suggère la **Figure 6.4**, avec une position intermédiaire de la France, en densité de stock, entre pays méditerranéens ou scandinaves, et pays de plaine et d'Europe centrale. Mais une analyse plus fine de la répartition des stocks en France montre que ce n'est pas la seule explication. La région de France au plus fort stock à l'hectare, Bourgogne-Franche-Comté (217 m³/ha, moyenne des données IFN 2011-2015), ou la région Grand-Est, juste derrière (212 m³/ha), présentent des contextes bioclimatiques et géologiques très semblables aux pays européens qui dépassent 300 m³/ha. La valeur maximale possible des stocks à l'hectare en France est donc probablement encore loin des valeurs actuellement observées.

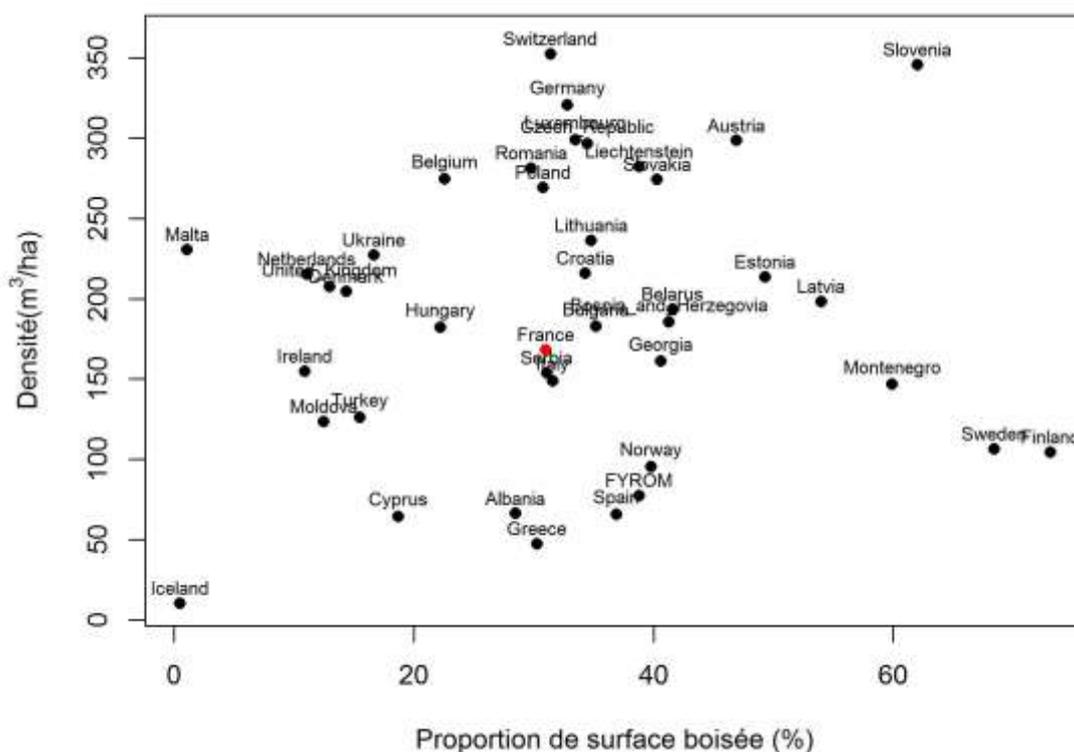


Figure 6.4. Densité en stock sur pied selon le taux de surface boisée des pays européens (source : Forest Europe, 2015)

Nos résultats ont montré que les erreurs minimales des modèles sont obtenues grâce aux stocks des statistiques anciennes reconstitués à partir des quantiles de 30 et 40% plutôt que des moyennes des valeurs de stock à l’hectare observées au début de l’IFN et montrent que **cette densification n’est pas uniquement le fruit d’un changement de structure de la forêt française (conversion de taillis) mais bien d’une densification généralisée (Figure 5.3 ; Tableau 5.4).**

L’augmentation, plus rapide en stock qu’en surface, indique que la forêt française est dans un stade avancé de l’expansion, où le stock a déjà eu le temps de capitaliser, et à une vitesse importante. Une phase plus précoce de l’expansion est illustrée par les forêts vietnamiennes qui présentent une augmentation de leur surface forestière alors que leur densité de stock sur pied diminue (Kauppi *et al.*, 2006 ; FAO, 2015).

L’augmentation du stock sur pied des forêts françaises en seulement 35 ans (entre 1975 et 2010) correspond à la totalité du stock sur pied des forêts de production espagnoles (944 millions de m³ ; Forest Europe, 2015). Ce résultat souligne l’importance de l’étude de l’expansion du stock sur pied permettant de comprendre à la fois la nature de ces nouvelles forêts, les causes de ces changements et leur dynamique. Dans un contexte de changement climatique et de mise en place de stratégies de bio-économie, l’inventaire forestier se présente alors comme un outil indispensable permettant le suivi annuel de ces changements.

3.2 Une expansion hétérogène dominée par les forêts privées

L’étude de l’expansion forestière a été effectuée en utilisant plusieurs facteurs de partition : la géographie (département/GRECO), le type de propriété et la composition. Ces facteurs montrent une forte hétérogénéité de l’expansion.

Alors que la transition forestière est un phénomène défini, à l’origine, à l’échelle d’un pays (Mather, 1992 ; Mather, 1999), nos résultats ont montré que les expansions en surface et en stock présentaient des hétérogénéités spatiales (Denardou *et al.*, 2017), comme il a déjà été observé pour les surfaces dans divers pays (en Suisse par Loran *et al.*, 2016 ; en Norvège par Fjellstad et Dramstad, 1999 ; aux Etats-Unis, avec la mise en évidence d’un gradient Est-Ouest par Kauppi *et al.*, 2006). Ces hétérogénéités sont l’empreinte des multiples facteurs de l’expansion.

Entre 1976 et 2010, l’expansion en surface était principalement localisée dans le Sud-Est et en Bretagne (Denardou *et al.*, 2017). Ces deux zones correspondent à des zones privilégiées de la déprise agricole (Chakir et Madignier, 2006 ; Renwick *et al.*, 2013). Après leur abandon, les terres se retrouvent boisées soit par plantation soit par accrus naturels, premier facteur de l’expansion forestière (voir partie I). Pendant la même période, les augmentations de stock sur pied étaient, elles, plus fortes dans le Massif Central. Or, entre 1908 et 1975, c’est dans le Massif Central que l’expansion en surface dominait. Cela semble lié aux plantations effectuées dans cette région, et principalement les plantations du FFN (+800 000 hectares ; Dodane, 2009) dont le Massif Central était une des zones privilégiées

(Betolaud, 1972). **Ce qui est donc observé actuellement dans le Massif Central est la maturation des plantations effectuées précédemment. Ce délai entre l'augmentation de stock et celle de surface a été mis en évidence de façon statistique** (voir partie modélisation de l'article 2). Le Massif Central continue à être marqué par cette période de fortes plantations. En effet, c'est dans cette GRECO que le nombre d'essences dominantes identifiées est le plus élevé (11 essences dominantes identifiées ; **Tableau 3.2**).

Une diminution du stock sur pied entre 1976 et 2010 a été observée dans trois départements : la Gironde (33), le département des Landes (40) et la Meurthe-et-Moselle (54 ; voir article 2). Cette diminution est associée aux tempêtes de 1999 et 2009 qui ont détruit respectivement 138,5 millions de m³ (Ministère de l'agriculture, 2006) et 43,3 millions de m³ (IFN, 2009), principalement localisés dans le Sud-Ouest et le Nord-Est de la France.

L'expansion en surface et en stock sur pied est principalement localisée dans les forêts privées (voir partie III). Alors que les changements relatifs de surface sont similaires pour les forêts communales et les forêts privées, ces dernières connaissent une augmentation de leur stock beaucoup plus rapide. A l'opposé, les forêts domaniales, historiquement plus intensément gérées, mais aussi mises en valeur par des stocks sur pied à l'hectare bien supérieurs, présentent les plus faibles changements de surface et de stock et ne sont donc que très peu concernées par les problématiques liées à l'expansion. Ceci est illustré par les analyses conduites sur la dynamique de ces forêts (voir partie IV) : quel que soit le niveau d'analyse retenu (GRECO x propriété, et avec les essences), les forêts domaniales apparaissent comme des compartiments ayant un rôle insignifiant voire négatif dans l'expansion des forêts (**Tableaux 4.12 et 4.14 ; Figure 4.41**). L'expansion en surface des forêts privées est liée à l'abandon des terres agricoles, phénomène observé dans toute l'Europe (Lasanta *et al.*, 2017; Keenleyside *et al.*, 2010).

Les forêts privées, qui sont les moins denses (100 m³/ha en 1976), ont connu la plus forte densification. Leur faible densité peut être liée à la fois à la part importante de taillis-sous-futaie dans ces forêts (43% de la surface contre 31% en forêt communale et 20% dans les domaniales, aujourd'hui, chiffres IFN) et à l'expansion forte des surfaces, impliquant une phase, peu dense, de mise en place de la forêt. Cependant, la différence entre les densités des différents types de propriétés tend à diminuer, confirmant les observations de Pignard (2000). Ici encore, la partie IV a permis de préciser ces constats. De façon remarquable, 40% de l'expansion en stock de bois décrite (*i.e.* 80% de l'expansion totale ; voir partie IV – 3.4) des forêts françaises se situe dans les strates de la forêt formées par les chênes en plaine, les chênes et le hêtre en moyenne et haute montagne, et les espèces de taillis (châtaignier, bouleau, charme) présentes dans les divers feuillus (**Figure 4.41**). A l'évidence, c'est dans cette série de faciès qu'on peut lire l'effet de la maturation des taillis d'essences feuillues (**Figure 4.41 ; Tableau 4.14**)

Parmi les types de composition, les forêts privées feuillues présentent les plus fortes expansions en surface et en stock (voir partie III ; articles 1 et 2), traduisant une expansion

dominée par les boisements naturels. Cependant, **la proportion de surface de forêts feuillues et résineuses, telle qu’appréciée avec la statistique Daubrée et les données d’inventaire actuelles, n’a pas évolué depuis le début du siècle avec un ratio constant de 2/3 de forêts feuillues**. Bien que l’expansion en stock de bois des forêts privées soit dominée par les feuillus, les résineux présentent la même intensité d’expansion en stock sur pied (IE = 1,2) et une augmentation relative semblable (+13,2% contre +12,7% pour les feuillus) traduisant la forte capitalisation de ces forêts. Il est intéressant de constater que la perception générale des usagers de la forêt est plus celle d’un enrésinement progressif et assez général. En fait, s’il y a bien eu enrésinement important de certaines strates de la forêt française (Denardou *et al.*, 2017), il est compensé par la progression des feuillus dans d’autres strates, correspondant le plus souvent à d’autres zones géographiques. Cette progression feuillue est moins facilement perçue.

L’importance de la déprise agricole dans l’expansion forestière a de multiples conséquences. Tout d’abord, celles concernant la gestion des nouvelles forêts (de Galbert *et al.*, 2015). En effet, l’augmentation spontanée des forêts est liée directement aux problématiques du morcellement de la propriété privée et de la non-gestion de ces forêts. Se développant sur d’anciens terroirs agricoles avec un parcellaire parfois très morcelé, les forêts nouvelles contribuent au morcellement de la propriété privée des forêts françaises, et à la difficulté de leur gestion. Mais il y a aussi les conséquences sur les trajectoires dynamiques de ces nouvelles forêts. Les sols anciennement anthropisés ne présentent pas les mêmes qualités et la même fertilité (Koerner *et al.*, 1997 et 1999) que les sols anciennement forestiers, entraînant une dynamique différente de ces forêts comparées aux forêts anciennes et pouvant expliquer en partie les fortes croissances observées dans les forêts privées (**Figure 4.26**) et la corrélation positive entre croissance et variation de surface (corrélation de 0,30 ; **Tableau 4.8**).

3.3 Des dynamiques d’expansion multiples

L’analyse de la dynamique de l’expansion a montré que l’intensité d’expansion est de façon très générale attribuable à des niveaux de prélèvements en deçà des niveaux d’accroissement biologiques, et qu’elle est renforcée par des niveaux élevés de croissance et de recrutement pour des ensembles forestiers jeunes et plantés.

Notre étude s’est focalisée sur 95% de l’expansion au niveau 1 et 80% au niveau 2 (voir partie IV – 3.4).

Au niveau 2, il a été possible d’identifier quatre groupes de facies dynamiques contribuant à l’expansion décrite :

- Les résineux des forêts privées (exemple du Douglas dans les forêts privées du Massif Central) à forte croissance et faible prélèvement (**Tableau 3.16**) dont l’intensité d’expansion est très élevée. Ces accroissements de stock sont la conséquence des

politiques de plantations. L'utilisation d'essences à forte croissance (Pourtet, 1972) et la plantation des arbres sur des sols anciennement agricoles (Koerner *et al.*, 1999) expliquent la forte croissance observée et permettent de comprendre les mécanismes sous-jacents à la capitalisation plus importante des résineux que des feuillus observée dans les forêts privées (Denardou *et al.*, 2017). Les forêts privées de la GRECO GO connaissent une expansion plus récente de surface que celle des forêts du Massif Central, dont l'expansion a été très forte lors de la première partie de la période du FFN (1946-1999 ; partie I – 1.3.4 ; **Figure 1.4**).

- Des stocks de forêts de haute et moyenne montagne. Contrairement aux résineux des forêts privées précédemment présentés, ces forêts, aux profils diamétriques plus matures, présentent des croissances assez faibles. L'exploitation de ces forêts est difficile à cause des conditions de terrain (fortes pentes, présence d'obstacles, etc. ; Constantin et Vanterin, 1998 ; IGN, 2012).
- Des feuillus sociaux de plaine et moyenne montagne, liés aux taillis en maturation. Ce groupe représente à lui seul 2/5 de l'expansion décrite.
- Les stocks des forêts, essentiellement privées, gérées de tradition forestière ancienne localisées dans le Nord-Est et le Sud-Ouest de la France.

Les stocks du premier groupe, présentant une forte croissance, sont plutôt liés à des strates dont l'expansion en surface est importante alors que ceux des trois autres groupes, présentant de faibles croissances, correspondent plutôt à des stocks en maturation stagnants du point de vue de la surface.

Les stocks de bois feuillus en forêt publique, contrairement aux résineux des forêts privées, présentent des flux de croissance faible et de forts prélèvements. Ainsi, ces forêts, et principalement les forêts domaniales, présentent une intensité d'expansion inférieure à 1 (*i.e.* une baisse de leur part dans la surface terrière totale) voire une décapitalisation. Cependant, il faut remarquer que ces forêts présentent des profils diamétriques assez matures, expliquant la gestion plus intensive observée dans ces strates.

Les flux de mortalité se sont montrés être relativement faibles par rapport aux autres flux dans toutes nos strates étudiées (Annexe IV.6). Cependant, le châtaignier se distingue des autres essences pour sa mortalité plus élevée, entraînant une diminution de la part que représente cette essence dans la surface forestière totale (Tableau 3.16). Ces fortes mortalités sont vraisemblablement dues à la maladie de l'encre, arrivée au XVIII^{ème} siècle en Europe (Vannini et Vettraino, 2001).

Sur un horizon de 100 ans, les taux de prélèvement de bois d'œuvre et d'industrie ont diminué dans la forêt française, à toute période où ils ont pu être analysés de façon homogène, et bien qu'un tableau historique d'ensemble ne soit pas aisément consolidable (**Figure 5.22**). Ces

observations corroborent l'idée que le niveau de prélèvements est un facteur historique d'évolution du stock de bois sur pied.

Les prélèvements par hectare ont diminué entre 1892 et 1929 mais ceux-ci sont assez stables au moins depuis 1980 (autour de 2,80 à 2,90 m³/ha/an ; **Figure 6.5**). De plus, tout récemment (depuis 2007 ; Partie V - 5), les taux de prélèvements semblent s'être intensifiés (**Figure 5.22**). Sur cette même période une expansion du stock sur pied est constatée (voir articles 1 et 2), et donc le puits de carbone forestier a été positif. **Ce résultat indique que lorsque les prélèvements de bois restent en deçà de l'accroissement biologique, ces derniers peuvent être augmentés tout en restant compatibles avec une augmentation du stock de bois. Il existe donc en pratique une marge d'intensification des prélèvements de bois compatible avec un maintien voire une augmentation de stock de bois dans les forêts.** Ce phénomène de prélèvements en deçà de la croissance est quasi-général en Europe (Forest Europe, 2015 ; **Figure 6.6**). Ainsi, l'intensification des prélèvements de bois votée par le parlement européen (Renewable Energy Directive¹²) dans l'optique d'augmenter l'utilisation des énergies renouvelable n'est pas nécessairement une menace au maintien voire à une augmentation du stock de carbone en forêt, dès lors que son niveau quantitatif est raisonné par rapport à l'expansion des forêts. Ce résultat amène à nuancer l'argument schématique qui oppose qualitativement prélèvements de bois et maintien du stock de bois (voir Searchinger *et al.*, 2018 et la lettre de chercheurs au parlement européen Beddington *et al.*, 2018 qui critiquent la mise en place d'une directive d'intensification des prélèvements de bois énergie).

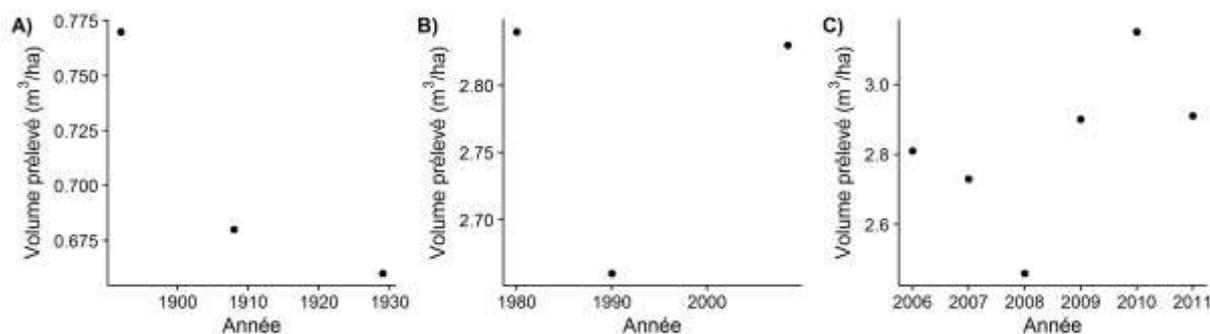


Figure 6.5. Volume bois d'œuvre et d'industrie prélevé par hectare selon A) les statistiques anciennes (statistiques agricoles de 1892 et 1929 et statistique Daubrée de 1908) et B) et C) les données de l'inventaire forestier national. Sur la figure B, la donnée de 2008 est une moyenne des prélèvements entre 2006 et 2010 et celle de 1980 est évalué sur seulement 53 départements. La droite rouge est la régression linéaire des prélèvements annuels entre 2006 et 2011.

¹² <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive>

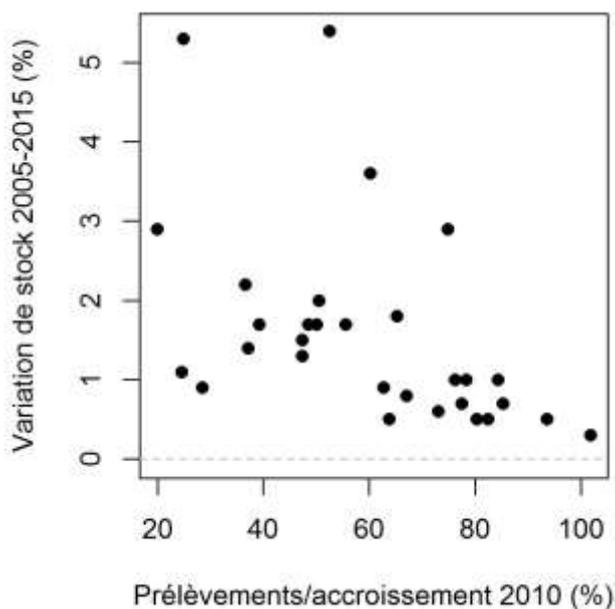


Figure 6.6. Variation de stock entre 2005 et 2015 en fonction de l'intensité de gestion (prélèvement/accroissement) en 2010 en Europe (hors Albanie ; Source : Forest Europe, 2015). La ligne tiretée représente une expansion de stock nulle.

L'analyse de la dynamique de l'expansion a montré qu'aucune strate ne correspondant à une absence de gestion, au grain où elles ont été définies. Pour satisfaire les directives visant à augmenter les prélèvements, la problématique française doit donc se porter sur la façon d'intensifier les prélèvements. Dans les quatre groupes précédemment identifiés, on peut remarquer que les résineux de forêts privées (premier groupe) et les feuillus de taillis en maturation correspondent à des stocks jeunes. Bien que les premiers peuplements FFN arrivent à maturation, une partie de ce stock n'est pas encore mobilisable. Les forêts de montagne sont difficiles d'accès et les contraintes physiques du milieu rendent ces stocks difficilement prélevables. La mise en place de modèles d'estimation de l'accessibilité de la ressource forestière permettrait de mieux choisir le système d'exploitabilité en fonction des contraintes du terrain et ainsi de faciliter les prélèvements dans les zones principalement montagnardes (Dupire *et al.*, 2015). L'intensification peut essentiellement se concentrer sur les forêts privées gérées dont les prélèvements restent plus faibles que la croissance, expliquant leur expansion importante (1/5 de l'expansion décrite ; **Figure 4.43**). Toutefois, les profils diamétriques de ce groupe, moins matures que ceux des forêts publiques, montrent que le choix de ne pas prélever l'intégralité de l'accroissement biologique est cohérent avec une optique d'accroissement de la valeur du capital. Dans le contexte actuel, il n'est donc pas possible d'égaliser prélèvement et croissance dans les forêts françaises. **Ces éléments**

suggèrent qu'un raisonnement global fondé sur le taux de prélèvement moyen des forêts et son augmentation potentielle est simpliste, et doit être dépassé.

3.4 Une expansion séculaire qui a accéléré dans le temps et qui ne présente pas de saturation

L'étude des changements de surface forestière depuis 1908 a montré que l'expansion en surface des forêts française a connu une augmentation de vitesse (+42 000 ha/an entre 1908 et 1975 contre +66 000 ha/an entre 1975 et 2010 ; Denardou *et al.*, 2017).

De plus, nos simulations ont montré que, **de la même façon que pour les surfaces, l'expansion en stock aurait été moins rapide au début de la période (Figure 5.1)** avec une capitalisation lente des peuplements déjà présents. Etonnement, **les modèles de capitalisation permettant la meilleure retranscription de l'évolution passée du stock sur pied ne sont pas les modèles classiques, concaves, de croissance des peuplements mais des modèles convexes (première phase du modèle sigmoïde de Hossfeld), soulignant la forte densification de la forêt française depuis 1850.** Entre 1908 et 1976, le rythme d'augmentation des stocks était de 13,0 millions de m³/an alors qu'entre 1976 et 2010 il était de 26,6 millions de m³/an, c'est-à-dire deux fois plus rapide. Ainsi, **la maturation des forêts anciennes semble plus lente que celle des forêts récentes**, pouvant être expliqué par plusieurs causes comme la mise en place des nouvelles forêts sur des sols anciennement agricoles et donc souvent plus fertiles (Koerner *et al.*, 1999) ou la plantation d'espèces à croissance rapide (Douglas, Epicéa de Sitka, Epicéa commun, Sapin pectiné). Une explication supplémentaire, dans les recolonisations naturelles, peut être un arrêt plus brutal des activités agricoles dans les territoires abandonnés aujourd'hui que par le passé, avec une baisse toute particulière des usages des terres en cours d'abandon. L'un des modes de valorisation de ce saltus dans le passé était l'élevage extensif ovin. Il était en effet de pratique courante de continuer à faire pâturer les terrains abandonnés, parfois pendant des dizaines d'années. Or, ce type de valorisation a fortement diminué. Rappelons que le cheptel ovin était de plus de 33 millions de têtes en 1852 (Rieutort, 1995), contre 7 millions environ aujourd'hui (données Agreste¹³), sans parler du cheptel caprin, qui jouait de façon encore plus marquée ce rôle de frein au développement de la forêt.

Sur la période couverte par l'IFN, **aucun signe de ralentissement de l'expansion en surface et en stock n'est observé** (article 2), contrairement aux résultats obtenus pour la surface par Cinotti (1996) à partir des données de diverses sources, dont le cadastre et l'enquête ministérielle « Teruti ». **Les forêts privées et les forêts feuillues privées ont même montré une accélération de l'expansion de leur stock sur pied.** Dans les forêts privées, une accélération de l'expansion en surface a également été observée. De plus, nos modèles statistiques ont montré l'effet positif et important du stock initial et de l'augmentation passée des surfaces sur les changements de stock des forêts (article 2). **La forêt française qui**

¹³ <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/saa2018T10bspca.pdf>

constitue un puits de carbone important (deuxième stock de carbone de l'UE-27 en 1990 ; Karjalainen *et al.*, 2003) **devrait donc voir ce puits encore fortement augmenter**. Cependant, un effet, plus faible mais récent, de la densité de stock est observé et pourrait, à long terme, entraîner un ralentissement, voir un arrêt de l'expansion. Mais le faible stock des forêts françaises comparé à celui des pays voisins, même dans des régions bioclimatiques similaires, laisse penser que cet arrêt ne devrait pas être imminent. Par ailleurs, il n'existe pas de corrélation entre expansion du stock et densité du stock au niveau européen (Forest Europe, 2015). Nos essais de reconstitution de l'évolution du stock sur pied depuis 1850 montrent que les meilleures simulations sont obtenues avec des modèles dont la densité maximale est élevée (400 ou 500 m³/ha en général), appuyant notre constat de non saturation ainsi que le potentiel d'expansion futur.

3.5 L'expansion forestière en France et dans le monde

Alors que la surface forestière mondiale est en diminution depuis 1990 (FAO, 2015 ; Keenan *et al.*, 2015), celle du continent européen présente à la fois une augmentation de surface et de stock sur pied. La forêt constitue un large puits de carbone (Pan *et al.*, 2011). Bien que le phénomène de transition forestière ne soit observé actuellement qu'au niveau des pays développés, la généralisation potentielle de ce phénomène au niveau planétaire serait possible dans moins de 70 ans (Pagnutti *et al.*, 2013). Dans le contexte actuel de changement climatique, comprendre l'origine et les mécanismes de la transition et de l'expansion forestière s'avère donc d'importance capitale afin de gérer la ressource de manière durable d'un point de vue social, économique et écologique (« forest principles »¹⁴ ; United Nations conference on environment and development, 1992).

Nous avons vu que l'expansion en surface des forêts françaises est principalement spontanée (**Figure 1.7**). Cela est à mettre en lien avec la diminution de la main d'œuvre agricole observée en général en Europe (Rudel *et al.*, 2005). En Asie du Sud et de l'Est, l'expansion est principalement due à un manque de ressources forestières qui a conduit à l'initiation de programmes de boisements. Cette deuxième cause d'expansion fait écho aux politiques de plantations (FFN et RTM) qui ont été initiées plus tôt (au XIX^{ème} et XX^{ème} siècle) en France afin de reconstruire les forêts françaises (de Vaissière, 1952 ; Combes, 1989).

Nos résultats montrent que la surface forestière française ne présente pas encore de saturation. De plus, la part de la surface boisée française est faible par rapport aux autres pays européens (**Figure 1.8**). Ainsi, elle devrait continuer à augmenter dans les prochaines décennies. Dans l'Est des Etats-Unis, un maximum d'expansion aurait déjà été atteint dans les années 70 (Drummond et Loveland, 2010), en lien avec l'expansion de l'urbanisation qui freinerait maintenant l'expansion des forêts. L'artificialisation du territoire est un phénomène qui touche l'ensemble de l'Europe (Laroche *et al.*, 2006). En France, l'augmentation des espaces

¹⁴ "Forest resources and forest lands should be sustainably managed to meet the social, economic, ecological, cultural and spiritual needs of present and future generations."

naturels et des espaces artificialisés se fait pour l’instant au détriment des sols agricoles (Enquête Teruti-Lucas 2014¹⁵). **Dans un futur lointain, une confrontation entre l’expansion des forêts et l’artificialisation des sols pourrait intervenir. Il serait alors possible que ce phénomène de diminution de surface forestière puisse être observé également en France. Cependant, le taux de boisement français est encore faible et il est peu probable que ce phénomène soit observé avant, au moins, plusieurs décennies.**

Alors que l’expansion forestière touche un nombre important de pays et que les informations sur les changements de surface forestière sont assez riches, peu d’études s’intéressent aux changements de stocks sur pied sur le long terme. On peut cependant citer certains travaux en Finlande (Henttonen *et al.*, 2017), pays qui a l’avantage d’avoir un inventaire national mis en place très tôt (1921), et en Suisse (Usbeck *et al.*, 2010) où un modèle a été utilisé afin de reconstituer le stock sur pied en 1860.

La France présente l’augmentation de stock forestier la plus importante d’Europe (Forest Europe, 2015). Cela peut s’expliquer à la fois par sa forte expansion en surface (également la plus forte d’Europe) mais aussi, et surtout, par la part importante de son stock en maturation. Ce stock est constitué à la fois de forêts montagnardes, difficilement récoltables, et de forêts jeunes (issues de plantations, d’abandons ou de conversion).

3.6 Le futur de l’expansion forestière

Nous avons montré que l’expansion ne présente pas de saturation en surface et en stock. De plus, l’effet positif du stock initial et de l’augmentation passée des surfaces laisse penser que l’expansion en stock devrait continuer encore plusieurs décennies. Nous avons utilisé le modèle sigmoïde de Hossfeld présentant la meilleure RMSEP (modèle unique pour les forêts anciennes et nouvelles ; **Tableau 5.4**) avec une hypothèse conservatrice, en considérant qu’à partir de 2010, la surface forestière n’évoluerait plus. La simulation a permis d’estimer le stock maximal de la forêt française à 6 milliards de m³ (*i.e.* plus de 2 fois le stock de bois français actuel), ce qui correspond à une densité de 389 m³/ha (pour comparaison, la densité de la forêt allemande était de 321 m³/ha en 2015 ; Forest Europe, 2015). **Sous ces hypothèses de simulation conservatrices (l’accumulation de stock ralentit, les surfaces n’augmentent plus), ce stock considérable est atteint au XXIV^{ème} siècle (Figure 6.7). Il souligne les temps caractéristiques de ces phénomènes, ainsi que le potentiel de séquestration de carbone existant.**

¹⁵ Données disponibles sur <http://agreste.agriculture.gouv.fr>

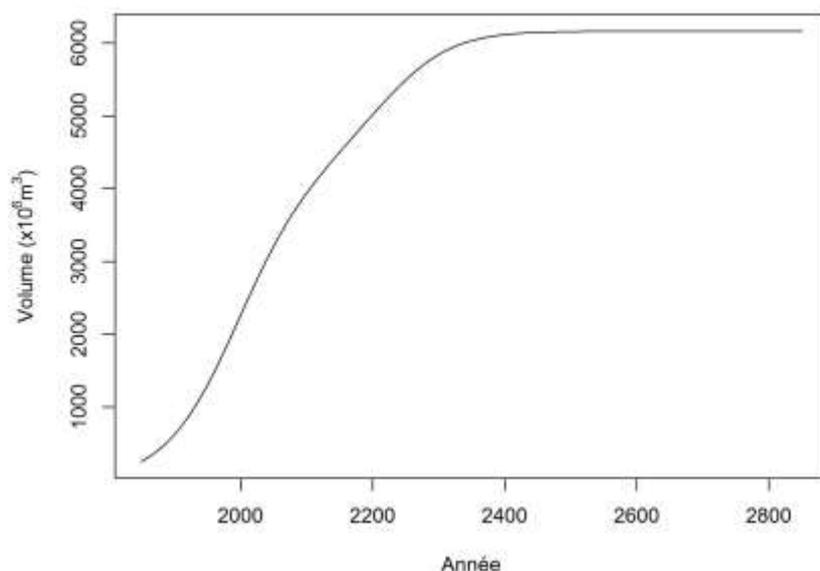


Figure 6.7. Projection temporelle du stock de bois forestier simulé à partir du modèle de densification présentant l'erreur d'ajustement la plus faible sur les données historiques de stock estimés en 1892, 1908 et 1929 (Figure 5.19 ; Talbeau 5.4) et une surface forestière stable depuis 2010.

Il n'est pas certain cependant, vu la proportion de surface boisée moyenne du territoire (31% ; **Figure 1.8**) que la surface se stabilise. L'enquête « Teruti Lucas » 2014¹⁶ nous renseigne sur l'occupation du sol en 2014. Sur les 10 catégories d'occupation, seules 3 semblent pouvoir devenir des terres boisées (sols cultivés, surfaces toujours en herbe et landes). Si l'on considère, à titre d'exemple, qu'encore 30% de ces sols peuvent se boiser, on aboutit à une surface maximum de 25 millions d'hectares. Cette surface correspondrait à une occupation de 45% du territoire, ce qui reste comparable à d'autres pays européens (par exemple 47% en Autriche). En considérant que la densité à l'hectare maximum est de 389 m³/ha on peut estimer un stock maximum théorique à 9 milliards de m³ (*i.e.* plus de 3 fois le stock de bois français actuel).

L'étude des profils diamétriques des forêts a montré que les forêts présentant les plus fortes intensités d'expansion présentaient aussi les profils diamétriques les plus jeunes (Tableau 4.17). Ces peuplements, issus de plantations, et dont la part dans la surface terrière initiale est assez faible (0,57, 0,19 et 1,74% de la surface terrière initiale pour les facies 1, 2 et 3 respectivement) devraient donc voir leur part augmenter fortement. Un deuxième groupe de facies présente une intensité d'expansion supérieure à 1, il s'agit de forêts assez matures et peu gérées. Si ces forêts ne sont pas exploitées davantage, leur expansion devrait diminuer, en

¹⁶ Disponible sur le site agreste.agriculture.gouv.fr

lien avec l'effet négatif de la densité sur le changement de stock (très faible, pour l'instant dans nos modèles, mais en augmentation ; article 2) et la faible expansion en surface de ces forêts.

Le changement climatique a un impact sur la productivité des forêts (Boisvenue et Running, 2006 ; Charru *et al.*, 2017) et pourrait accélérer le processus d'expansion du stock. Cependant, un lien est aussi observé avec la mortalité (Allen *et al.*, 2010).

Une récente expertise collective INRA-IGN (Roux *et al.*, 2017) envisage plusieurs scénarios de gestion pour la forêt française dont un d'« intensification et augmentation des prélèvements, simulés par un plan de reboisement actif » qui considère un reboisement (*i.e.* plantations sur des sols déjà boisés) de 500 000 ha sur 10 ans. Cela correspond à 0,3% de la surface forestière actuelle et à la moitié des reboisements qui ont été effectués par le FFN entre 1946 et 1999. Un tel reboisement, même avec des essences à forte croissance, ne devrait donc pas avoir un impact important sur l'expansion de stock.

Il serait aussi possible que, dans un futur lointain, l'expansion urbaine commence à entrer en concurrence avec l'expansion forestière, comme cela est déjà observé dans l'Est des Etats-Unis (Drummond et Loveland, 2010). Cependant, ce phénomène est observé dans cette région pour un pourcentage de surface boisée beaucoup plus élevé que celui de la France (supérieur à 50%) et laisse donc penser que les forêts françaises ont encore une marge d'expansion conséquente.

4 Conclusions et perspectives

4.1 Principales conclusions

La compréhension de l'expansion ne peut se faire qu'à partir d'une analyse sur des temps longs, correspondant au pas de temps forestier. **Notre estimation du stock sur pied au début du XX^{ème} siècle a permis de pallier le manque d'information ancienne le concernant et ainsi de pouvoir étudier son évolution, en parallèle à celle des surfaces, sur le long terme.** L'expansion forestière est forte depuis 1850 avec une **expansion plus rapide en stock qu'en surface, montrant que la forêt française est déjà dans une phase avancée de l'expansion.** Alors que le rythme d'expansion en surface et en stock a augmenté sur la période, **aucune saturation n'est pour l'instant observée.** La forte expansion en surface, le délai entre expansion en surface et expansion en stock et l'effet positif du stock initial sur le changement de stock montrent que **l'augmentation du stock sur pied devrait continuer encore plusieurs décennies, constituant ainsi un large puits de carbone.** L'étude de l'expansion et, plus particulièrement, celle de l'expansion du stock constituent donc un enjeu majeur dans le contexte actuel de changement climatique. **L'apparition à un rythme soutenu de ce nouveau stock doit être prise en compte dans l'élaboration de politiques de gestion durable des forêts.**

L'expansion en surface et en stock a montré une forte hétérogénéité selon les facteurs étudiés (géographie, propriété et composition). Les forêts privées, et principalement les forêts privées feuillues, présentent l'augmentation de surface la plus importante, signe de la **nature principalement spontanée de l'expansion en surface**, majoritairement localisée actuellement en Bretagne et dans le Sud-Est de la France. Cependant, au niveau national, la part relative en surface des forêts feuillues et résineuses n'a pas évolué depuis 1908. Avant 1976, l'expansion en surface était principalement localisée dans le Massif Central et résulte en grande partie des plantations du FFN.

L'étude de la dynamique de l'expansion a montré que **l'expansion en stock est principalement dirigée par la croissance et les prélèvements**. Quatre groupes de facies, principalement constitués de stocks de forêts privées, expliquent l'augmentation du stock : des résineux en expansion de surface (jeunes plantations ; 1/5 de l'expansion), des stocks en maturation (forêts montagnardes et feuillus sociaux de plaine et moyenne montagne ; respectivement 1/5 et 2/5 de l'expansion) et des stocks de forêts privées gérées mais dont les prélèvements restent plus faibles que la croissance (1/5 de l'expansion). **L'expansion en stock semble donc principalement expliquée par une maturation des peuplements**.

Bien que l'ensemble de la forêt semble avoir connu une densification, nos modèles ont montré que **les forêts déjà présentes en 1850 (dites forêts anciennes) semblent avoir présenté une densification plus lente que les forêts implantées depuis**. La modélisation de l'expansion en stock ne peut donc se faire qu'en utilisant des modèles de densification différents pour les deux types de forêts.

4.2 Perspectives de recherche

4.2.1 Différenciation des forêts privées gérées

Les forêts communales, bien que correspondant seulement aux forêts soumises, ont une dynamique assez proche de celle des forêts privées (**Tableau 4.14**). Ces forêts semblent donc se comporter de façon relativement intermédiaire entre les forêts domaniales et les forêts privées, expliquant leur forte capitalisation (articles 1 et 2). Cependant, les forêts privées regroupent à la fois des forêts privées gérées et non gérées (par choix ou par abandon du terrain). Il serait intéressant de pouvoir séparer ces deux derniers types et de comparer les forêts privées gérées aux forêts publiques afin de mieux déterminer l'effet de la gestion sur l'expansion.

La séparation exacte des forêts privées gérées de celles non gérées ne semble pas possible mais la donnée spatialisée des forêts privées ayant un plan simple de gestion (PSG) apporterait déjà une première idée des forêts potentiellement gérées. Cette donnée est disponible sur les dernières années d'inventaire seulement. Si l'on considère que la localisation des forêts privées sous PSG n'a pas beaucoup évolué, il serait possible, en utilisant les coordonnées des points d'inventaires plus anciens, de séparer en deux sous-