
Analyse et simulation du stock de bois
des forêts françaises sur un horizon
séculaire

1 Introduction

1.1 Contexte

La partie III nous a permis d'examiner la dynamique du stock de bois sur 40 ans. L'intensité de ces changements amène à s'interroger sur la trajectoire de ce stock sur un horizon temporel plus profond. Le stock sur pied a augmenté trois fois plus vite que les surfaces sur la période 1976-2010 et cette augmentation de forte intensité ne présente aucune saturation. Cependant, cette information, cruciale dans le cadre de politiques de gestion forestière, n'existe pas dans les statistiques du début du siècle (ni dans l'enquête Daubrée, ni dans les statistiques agricoles ; partie II – 2.2) et empêche ainsi toute reconstitution de l'évolution des stocks sur le long terme.

Peu de pays européens ont un inventaire forestier assez ancien pour pouvoir reconstituer une évolution sur le long terme de l'expansion du stock sur pied de leurs forêts (+70% entre les périodes 1921-1924 et 2009-2013 en Finlande ; Henttonen *et al.*, 2017 ; Liski *et al.*, 2006). Dans ce contexte, une voie consiste à essayer d'estimer indirectement ce stock. C'est le cas, par exemple en Suisse où une estimation à partir d'un modèle de la densité de stock de ses forêts entre 1860 et 1951 combinée à une interpolation des données de l'IFN entre 1952 et 2006 a suggéré que le stock des forêts suisses avait pu augmenter de +292% entre 1860 et 2006 (Usbeck *et al.*, 2010).

1.2 Objectifs

Dans ce chapitre, nous proposons un essai de reconstitution du stock de bois à différentes dates situées au voisinage du début du XX^{ème} siècle, par une méthode d'imputation conditionnelle utilisant à la fois les données de densité de stock de l'IFN et les données de surface de trois statistiques anciennes : l'enquête Daubrée (Daubrée, 1912), décrivant l'état des forêts en 1908 et les statistiques agricoles de 1892 et 1929 (ministère de l'agriculture, 1897 et 1936), qui l'encadrent. **Nous avons ensuite essayé de reconstituer, par modélisation, la chronologie d'évolution du stock sur l'ensemble du XX^{ème} siècle, afin de situer les phénomènes actuels dans un temps plus long et de préciser le niveau de plausibilité de la reconstitution antérieure. L'objectif est ici d'identifier à quelles conditions sur l'accumulation de stock net moyen à l'hectare il est possible de restituer les tendances historiques estimées, et parmi l'ensemble de ces dernières, lesquelles sont les plus plausibles.**

Ce chapitre est composé de deux sections (estimations des stocks anciens et simulation) de matériel et méthodes, ainsi que d'une section de résultats.

2 Estimation du stock au voisinage du début du XX^{ème} siècle

2.1 Principe

Les forêts françaises sont très diverses (13/14 des types forestiers identifiés en Europe ; Barbati *et al.*, 2014). Cette diversité représente à la fois une diversité de milieux écologiques (climats et sols) ainsi que de gestion qui peut influencer la densité de stock des peuplements forestiers, que l'on cherche à reconstituer. Une approche de reconstitution conditionnelle à des données de référence doit donc essayer de contrôler le plus possible de facteurs influençant cette variable.

A la fois la variabilité du milieu environnemental (qui conditionne la croissance) et celle de la gestion (notamment les prélèvements qui influencent fortement la densité du stock) peuvent être approchés par une stratification géographique assez fine au niveau national. Le stock de bois dépend encore d'autres facteurs à des niveaux plus fins, comme les espèces forestières et le mode de gestion dans lequel elles sont conduites. Enfin, à conditions biologiques et écologiques données, la propriété foncière reste déterminante.

Les données d'inventaire forestier permettent de ventiler le stock de bois selon ces différentes caractéristiques de la forêt, et d'estimer une densité de stock de référence pour chaque contexte. C'est cette donnée d'inventaire qui peut être mise à profit pour une reconstitution de stock dans les statistiques anciennes.

Dans les statistiques anciennes utilisées, l'information systématiquement disponible comprend une ventilation des surfaces forestières par département, par propriété et par mode de gestion, **ces variables étant des facteurs qualitatifs croisés** (voir partie II – 2.2). Dans ce contexte, la méthode de reconstitution qui semble la plus légitime est une méthode d'imputation simple, conditionnelle au niveau de ces facteurs (Särndal, 1992). Concernant les espèces forestières, l'information sur les surfaces par essence disponible dans la statistique Daubrée a été utilisée (voir 3.3). Cette variable n'est pas croisée avec l'information de mode de gestion et une redistribution des surfaces feuillues et résineuses par mode de gestion a été effectuée.

Remarques importantes :

- 1) **dans un contexte non stationnaire, la donnée de référence pour les stocks doit également être questionnée, puisque la densité de stock augmente au cours du temps. Elle a justifié une analyse de sensibilité, déclinée (1) en périodes d'inventaire de référence, (2) en statistiques cible (moyenne ou gamme de quantiles).** Sous l'hypothèse d'une densification progressive de la forêt sur l'ensemble de la période d'étude, les quantiles inférieurs de la distribution du stock à l'hectare ont également été imputés (de 0,10 à 0,50 par classe de 0,05), ainsi que les quantiles de 0,55 et 0,60 permettant d'encadrer la moyenne.

- 2) **Tandis que l'information présente dans les statistiques anciennes correspond, à priori, à un mode de gestion objectif de la forêt, l'information collectée sur l'inventaire est une structure verticale physique. Si la présente analyse s'autorise par hypothèse de travail l'identification de ces catégories, elles peuvent être sources d'erreur.** Par exemple un taillis en conversion selon statistiques anciennes peut correspondre à un taillis, ou une futaie constatée en inventaire, ou encore des peuplements classés en taillis sous futaie (TSF) anciennement qui pourraient être classés en futaie irrégulière dans l'inventaire forestier.

Afin d'estimer le stock sur pied des forêts françaises au voisinage du début du XX^{ème} siècle, nous avons décidé d'utiliser une imputation conditionnelle associant à chaque strate de la forêt au début du siècle la moyenne du stock à l'hectare, observé dans les données de l'inventaire national, des forêts appartenant au même type de strate. **Les strates ont été définies en utilisant des combinaisons de critères de géographie (département), de gestion (propriété, structure) et de composition en essence.**

2.2 Données utilisées

Les reconstitutions se fondent sur l'estimation du volume de bois à l'hectare des forêts selon des stratifications des données de l'inventaire forestier (facteurs évoqués en 3.1), permettant l'imputation de ces estimations sur les surfaces stratifiées du début du siècle.

Deux périodes distinctes dans les données IFN (voir partie II – 2.1) ont été utilisées (**Figure 5.1**), permettant une analyse de sensibilité de l'effet de la période des données utilisées sur le résultat produit :

- Les premiers inventaires départementaux disponibles en base en ancienne méthode (AM ; année moyenne : 1983)
- Une moyenne des données nouvelle méthode (NM) entre 2006 et 2014 (année moyenne : 2010)

2 – Estimation du stock au voisinage du début du XX^{ème} siècle

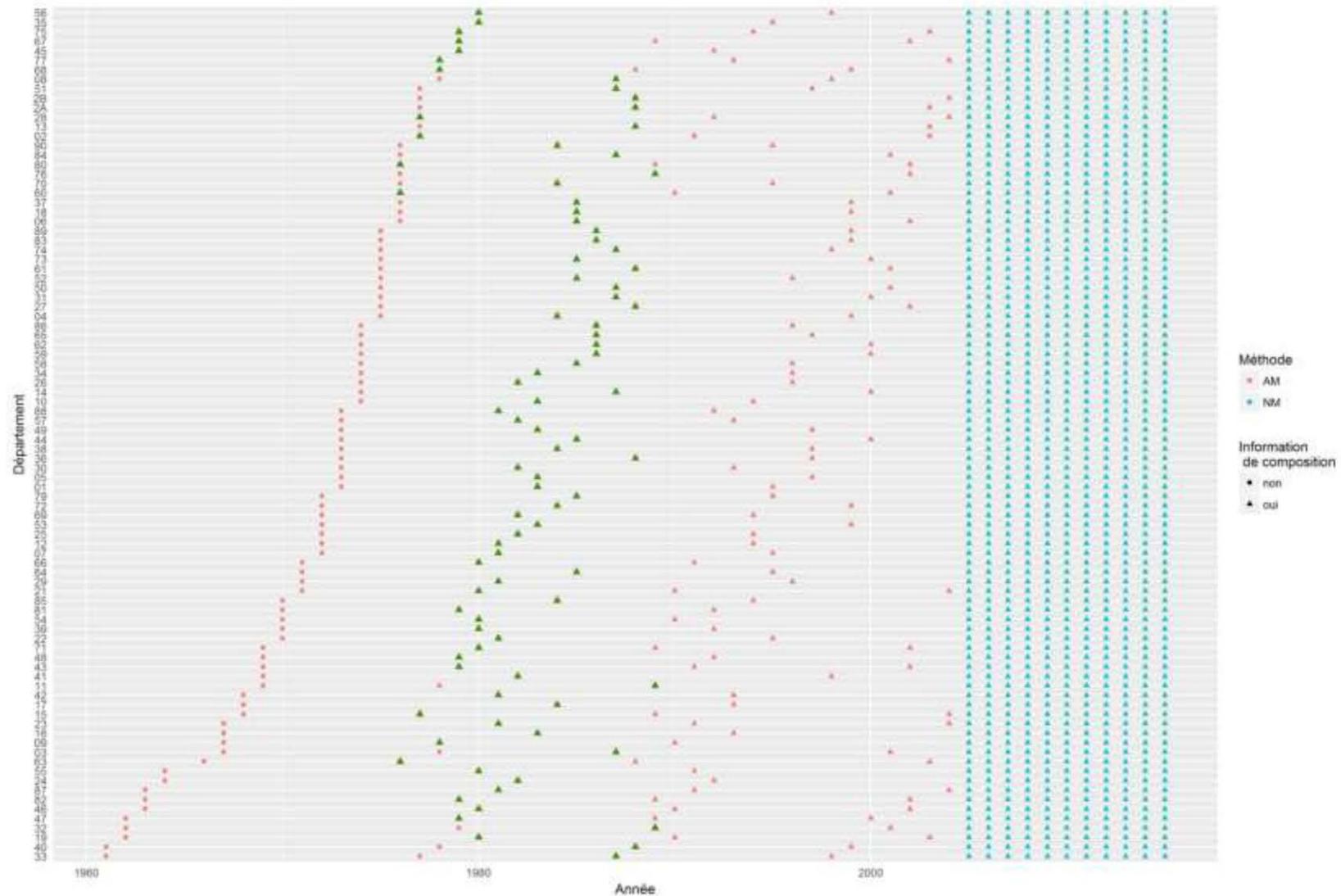


Figure 5.1. Inventaires IFN départementaux en fonction de l'année, de la méthode d'inventaire et de la disponibilité des données de composition en essence. En vert : données « ancienne méthode » utilisées.

2.3 Partition de la forêt française

2.3.1 Principes généraux

Les critères de partition prennent en compte les départements, la propriété, la structure et la composition en essence.

Les départements utilisés sont ceux identifiés par l'inventaire forestier. Les départements 2A et 2B sont regroupés en un seul département « Corse » pour correspondre aux données anciennes qui ne les distinguent pas.

La propriété a été considérée selon trois catégories (forêt domaniale, autres forêts publiques soumises, et forêt privée – qui inclut les forêts communales non soumises).

La structure est divisée en plusieurs catégories qui diffèrent d'une statistique à l'autre (voir partie II – 2.3). Une homogénéisation des données a été nécessaire et a permis de diviser cette donnée en trois catégories (futaie, TSF et taillis ; **Tableau 2.4**).

La composition en essence des peuplements n'a été étudiée que pour la statistique Daubrée. Une ventilation de la surface forestière par essence (15 essences étant explicitées) est disponible. Cependant, aucune information n'est disponible quant au protocole d'estimation de ces dernières surfaces, on peut considérer que l'essence indiquée correspond soit à une essence majoritaire (du point de vue soit du couvert soit de la surface terrière) soit à une essence objective (du point de vue de la gestion). Pour une meilleure homogénéisation avec les données IFN, correspondant à l'essence majoritaire, elle a été classée en deux catégories : feuillus et résineux, le regroupement des essences permettant de s'affranchir du problème de définition et ainsi permettre une meilleure homogénéisation. Les surfaces de composition « non identifiée » dans la statistique « Daubrée » ont été attribuées à part égale aux résineux et aux feuillus.

L'estimation d'un volume à l'hectare moyen a été effectuée au sein d'un système emboîté de partitions de la forêt française. Les différentes partitions sont explicitées dans le **Tableau 5.1**.

Partition	Département	Propriété	Structure	Composition
1	X			
2	X	X		
3	X		X	
4	X	X	X	
5	X	X		X
6	X	X	X	X

Tableau 5.1. Partitions de la forêt française utilisées pour l'estimation du stock à l'hectare moyen et de quantiles dans la gamme 0.1 – 0.6. En gris : les partitions utilisées seulement pour la reconstitution des stocks de la statistique Daubrée

2.3.2 Cas particuliers

Plusieurs difficultés particulières se sont posées, conduisant à faire entorse aux principes généraux exposés :

Statistiques de 1892 et 1908

- 1) Les données des statistiques de 1892 et 1908 ne couvrent pas l'Alsace-Moselle, alors annexée. Elles ont été complétées grâce aux données de la statistique allemande de 1908 (Ministerium Für Elsaß-Lothringen, 1909) pour la statistique Daubrée et les données de Hüffel (1920) pour la statistique agricole de 1892. Ces données ne sont cependant pas détaillées par mode de gestion. **Il n'a donc pas été possible de faire une estimation par type de structure pour ces trois départements et une estimation plus simple, par département ou département x propriété a été utilisée.**
- 2) La catégorie « périmètres décrétés » de la statistique de 1892 n'a pas été prise en compte dans nos calculs car ces surfaces, correspondent à la surfaces des périmètres décrétés des reboisements RTM. L'ensemble de ces périmètres ne sont pas nécessairement boisés et cette surface ne correspond qu'à une surface potentiellement boisée. De plus, ces reboisements ont commencé en 1860 et correspondent donc, pour une bonne partie, à des reboisements très récents.
- 3) Dans la statistique Daubrée, une catégorie « surface improductive » est identifiée. Ces surfaces correspondent à des surfaces sans volume forestier ou à très faible volume. Un stock nul leur a donc été imputé.
- 4) Les données de la statistique agricole de 1892 et de la statistique Daubrée présentent une catégorie de mode de gestion appelée « taillis en conversion ». La conversion, débutée au début du XIX^{ème} siècle (Schaeffer, 1949 ; Husson et Degron, 1999), est en cours à cette époque, et les peuplements ont une structure probablement plus proche de celle des taillis et des TSF que des futaies. Par hypothèse de travail, on a choisi d'attribuer les surfaces forestières correspondantes aux TSF. Un test de sensibilité relatif à ces affectations de surface dans les différents modes de gestion a été effectué sur les données de la statistique Daubrée (**Tableau 4.2**).
- 5) Les informations de structure et de composition en essences n'étaient pas croisées dans la statistique Daubrée. Il a donc été indispensable de les reconstituer. Pour cela, on a choisi d'affecter les surfaces des forêts résineuses de façon prioritaire au mode de gestion de la futaie, puis aux TSF, si la surface résineuse était plus importante que la surface des futaies, et enfin aux taillis si toute la surface résineuse n'était pas attribuée. Ce dernier cas n'a été rencontré que pour quatre couples département propriété (les

forêts privées des départements des Alpes-de-Haute-Provence, des Hautes-Alpes, des Bouches-du-Rhône et de la Drôme) et représente, au total, moins de 15 000 ha (*i.e.* < 0,15 % de la surface forestière totale).

Statistique de 1929

- 1) Les données de la statistique de 1929 ne permettent pas, au sein des forêts publiques soumises, de distinguer les forêts domaniales des autres forêts publiques. Seules deux catégories de propriété ont été utilisées pour ces données : forêt publique soumise au régime forestier (regroupant les forêts domaniales et les autres forêts publiques soumises, notamment communales) et forêt non soumise (correspondant essentiellement aux forêts privées) au régime forestier (**Tableau 2.3**).
- 2) La statistique de 1929 présente une modalité additionnelle de stratification des surfaces, correspondant à la forêt « récemment boisée ». Nous avons fait l'hypothèse de travail que ces jeunes forêts **ne présentaient qu'un très faible stock sur pied et étaient principalement composées de résineux (justifier cette dernière assertion avec ton chapitre introductif de thèse)**. Un stock à l'hectare égal au quantile 0.05 du stock à l'hectare des forêts résineuses de même strate (département x propriété x structure) leur a été imputé.

2.4 Méthode de reconstitution du stock

Le support des estimations est défini par un système de partitions de référence (voir 3.3, **Tableau 4.1**), formées de strates. Au sein de ces strates, on dispose de points de sondage d'inventaire.

Sur chaque point i d'inventaire d'une strate j , un volume à l'hectare (D_{ij}) a été estimé ainsi que la surface (S_{ij}) que représente le point. A partir de ces données, un volume à l'hectare moyen de la strate j ($D_{moy,j}$) a été calculé.

$$D_{moy,j} = \frac{\sum_{i \in j} D_{ij} \cdot S_{ij}}{\sum_{i \in j} S_{ij}} \quad (1)$$

De plus, les quantiles du stock à l'hectare de chaque strate, allant des niveaux 0,10 à 0,60, ont été calculés avec un pas de 0,05.

Dans le cas où une catégorie identifiée dans les statistiques anciennes n'a pas été inventoriée dans les inventaires forestiers nationaux, un stock à l'hectare nul lui a été attribué. Cependant, cela n'a été que très peu rencontré (**Annexe V.1**).

2.5 Intervalle de confiance du stock au début du siècle pour les imputations conditionnelles fondées sur la moyenne

En complément à l'estimation du stock par imputation conditionnelle (Vol_{ds}), on a cherché à en estimer l'erreur. Un intervalle de confiance (IC) a donc été calculé, qui a la forme suivante :

$$IC = [Vol_{ds} - q(0,975)\sqrt{V(Vol_{ds})}, Vol_{ds} + q(0,975)\sqrt{V(Vol_{ds})}] \quad (2)$$

Tout d'abord, la variance de la densité de stock dans la strate j (D_j) sous l'hypothèse d'indépendance entre les points i de sondage est donnée par :

$$V(D_j) = \frac{\sum_{i \in j} S_{ij} (D_{ij} - D_{moy,j})^2}{\sum_{i \in j} S_{ij}} \quad (3)$$

Avec $D_{moy,j}$, densité moyenne d'une strate j , estimée à partir des densité des points i qui composent cette strate (D_{ij}) et de leur surface (S_{ij}) :

$$D_{moy,j} = \frac{\sum_{i \in j} S_{ij} D_{ij}}{\sum_i S_{ij}} \quad (4)$$

Sous l'hypothèse d'indépendance entre les points de sondage, la variance de la densité de stock moyenne dans la strate j ($D_{moy,j}$, variance d'une moyenne) est donc calculée comme suit :

$$V(D_{moy,j}) = \frac{\sum_{i \in j} (S_{ij}^2 \cdot V(D_j))}{(\sum_{i \in j} S_{ij})^2} \quad (5)$$

Sachant que Vol_{ds} a été estimé à partir des surfaces des différentes strates étudiées au début du siècle ($S_{ds,j}$) et le volume à l'hectare moyen de ces strates dans les données inventaire ($D_{moy,j}$) :

$$Vol_{ds} = \sum_j (S_{ds,j} \cdot D_{moy,j}) \quad (6)$$

On a finalement :

$$V(Vol_{ds}) = \sum_j (S_{ds,j}^2 \cdot V(D_{moy,j})) \quad (7)$$

Les densités des différentes strates étant indépendantes, on obtient la variance de Vol_{ds} .

2.6 Résultats

2.6.1 Estimations du stock ancien fondées sur une imputation conditionnelle de la densité de stock moyenne

Les estimations (**Figure 5.2, Tableau 5.2**) révèlent en premier lieu que les estimations de stock sur les statistiques anciennes sont en deçà des estimations actuelles issues de l'inventaire forestier.

Partition	Stocks estimés (x 10 ⁶ m ³)					
	1892		1908		1929	
	AM	NM	AM	NM	AM	NM
1	1321	1611	1332	1618	1444	1749
2	1340	1622	1360	1637	1437	1725
3	1192	1348	1275	1460	1320	1480
4	1219 ± 11	1358 ± 17	1306 ± 10	1470 ± 16	1346 ± 8	1486 ± 15
5	NR	NR	1328	1682	NR	NR
6	NR	NR	1307	1481	NR	NR

Tableau 5.2. Estimations des stocks anciens (1892, 1908 et 1929) selon la partition et les données de l'inventaire forestier utilisées (premier inventaire disponible –AM- ou données de la nouvelle méthode - NM). Un intervalle de confiance a été calculé pour la partition par département, propriété et structure (4^{ème} partition). NR signifie « non renseigné »

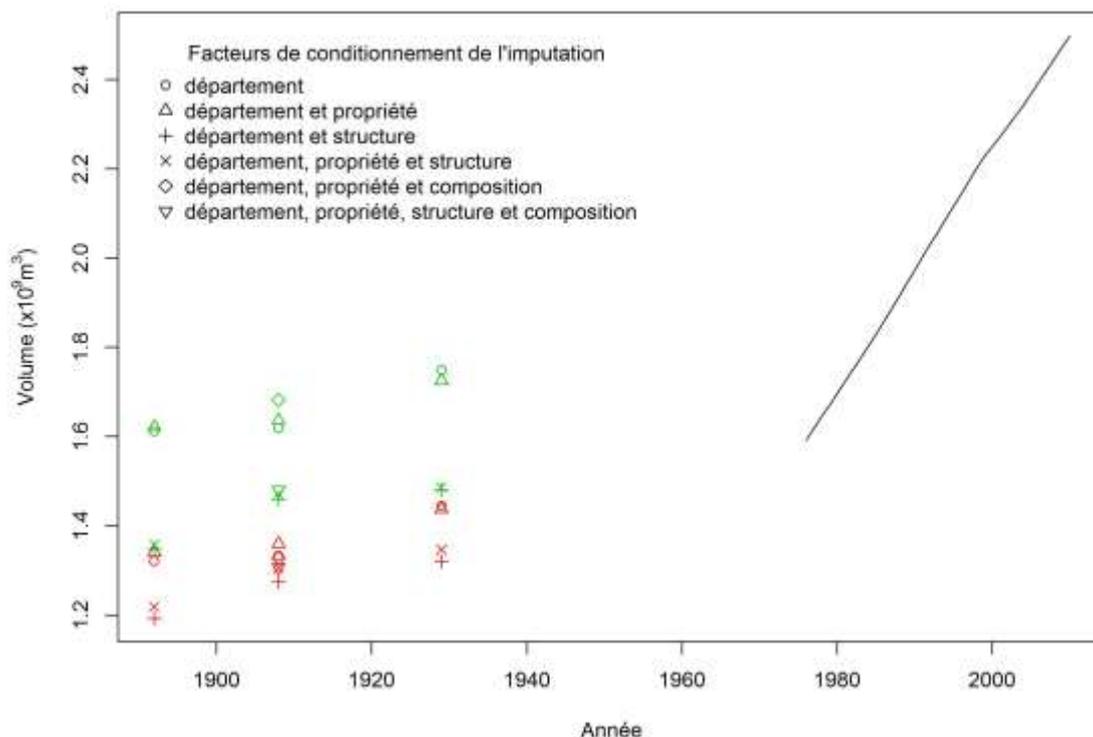


Figure 5.2. Estimation du stock total de bois (volume bois fort tige) en 1892, 1908 et 1929 selon les différentes partitions conditionnant l'estimation, et la période de référence pour les données d'inventaire forestier. En rouge : estimation effectuée à partir des données ancienne méthode de l'inventaire forestier. En vert : estimation effectuée à partir des données nouvelle méthode

On remarque une forte variation des résultats selon les données utilisées (AM ou NM ; Tableau 5.2 ; Figure 5.2). Les résultats provenant de l'imputation à partir des données AM sont plus faibles, retranscrivant bien la capitalisation importante du stock entre les deux périodes où les données ont été collectées (+39 m³/ha au niveau national). Cette capitalisation touche tous les types de structure (Figure 5.3). Pour la partition la plus fine (département x propriété et structure), cette différence en 1908 est de 165 millions de m³. Ce résultat nous pousse à utiliser les données AM, à priori plus proches des valeurs de la forêt au début du XX^{ème} siècle, plutôt que les NM pour localiser le stock.

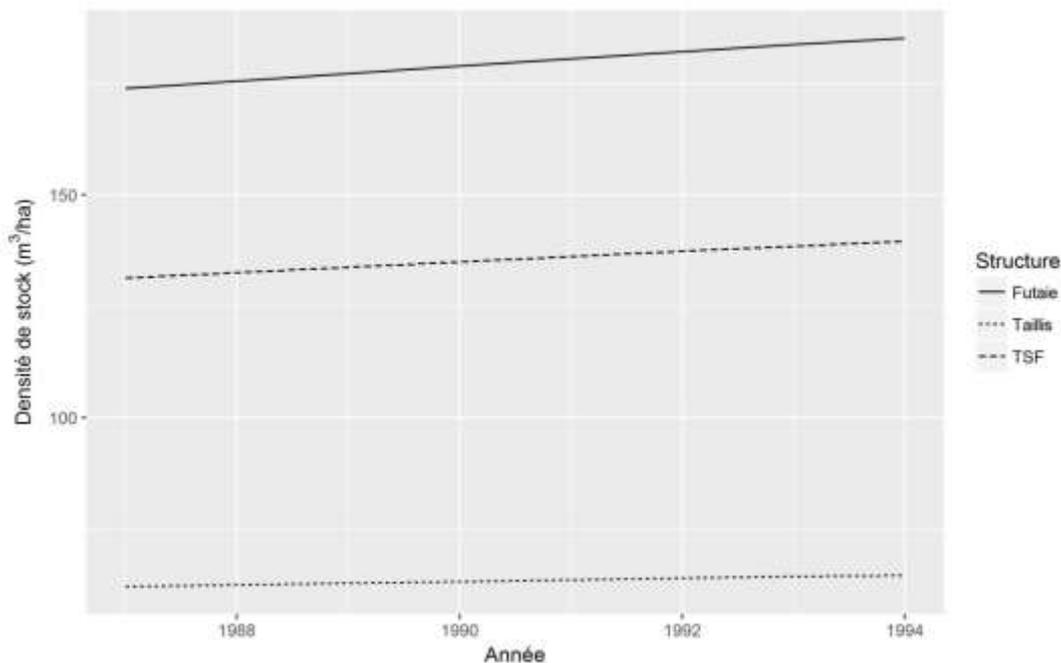


Figure 5.3. Evolution de la densité de stock entre 1987 et 2010 en fonction du type de structure

On observe ensuite une forte variation du volume calculé selon la partition utilisée (Figure 5.2 ; Tableau 5.2). En général, beaucoup d'estimations semblent élevées et incompatibles avec les estimations récentes de stock. En effet, pour 1908, la densité moyenne nationale de stock sur pied est comprise entre 130 et 171 m³/ha (*i.e.* un stock entre 1.28 et 1.68 millions de m³ ; Tableau 5.2), et serait donc supérieure à la densité moyenne en 1976 (121 m³/ha).

Les plus faibles estimations de stock, qui semblent être aussi les plus cohérentes avec les données d'inventaire récentes, sont obtenues avec les partitions prenant en compte la structure des peuplements, ce qui conforte le rôle majeur de cette variable comme variable de partition. Lorsque la structure est prise en compte, l'effet additionnel de la propriété forestière a un effet négligeable.

On observe encore une plus forte variation des estimations entre partitions lorsqu'elles s'appuient sur les densités de stock de référence issues de la NM, plutôt que de celles issues de l'AM. En NM, les estimations provenant d'une imputation prenant en compte la structure sont beaucoup plus faibles que les autres. Les forêts couvertes par l'AM ont une répartition des surfaces selon les structures forestières plus proche de celle des forêts anciennes que ne l'est celle des forêts de la NM (Tableau 5.3), expliquant ces fortes variations quand on prend en compte la structure en NM. Cette différence entre la structure ancienne et actuelle des forêts peut s'expliquer, par exemple, par la vague de conversion des TSF au XX^{ème} siècle

(Mather *et al.*, 1999 ; Degron, 1998 et 1999). De plus, tandis que la densité de stock a beaucoup augmenté en futaie (+36 m³/ha entre 1983 et 2010 ; +22% ; **Tableau 5.4**), la structure de taillis implique une densité de stock beaucoup plus stationnaire (+6 m³/ha ; +10%).

	1908	1983	2010
Taillis	25 %	18 %	12 %
TSF	41 %	33 %	31 %
Futaie	34 %	49 %	57 %

Tableau 5.3. Répartition des surfaces selon la structure forestière. Les données de 1908 proviennent de la statistique Daubrée, celles de 1983 du premier inventaire de l'inventaire forestier disponible en base et celles de 2010 d'une moyenne des inventaires forestiers entre 2006 et 2014.

	1983	2010	Augmentation relative
Taillis	60 m ³ /ha	66 m ³ /ha	+10%
TSF	127 m ³ /ha	148 m ³ /ha	+17%
Futaie	166 m ³ /ha	202 m ³ /ha	+22%

Tableau 5.4. Différences du stock à l'hectare des structures forestières entre 1983 (année moyenne du premier inventaire de l'inventaire forestier disponible en base) et 2010 (moyenne des inventaires forestiers entre 2006 et 2014)

Etonnamment, l'ajout de la prise en compte des compositions à la stratification par département x propriété x structure (qui ne concerne que la statistique forestière Daubrée) ne semble pas avoir un fort impact sur les résultats. Cela peut s'expliquer par le fait que la corrélation entre la part de la surface résineuse en AM et celle en 1908 à l'intérieur des strates définies par les départements, le type de propriété et la structure est forte (0,75 ; $p < 2,2 \cdot 10^{-16}$). De plus, la densité moyenne des futaies feuillues (191 m³/ha) est très proche de celle des futaies résineuses (214 m³/ha). La prise en compte des compositions quand les structures sont déjà définies n'a donc pas un impact significatif sur les résultats.

Quel que soit la partition utilisée, nos estimations semblent surestimées et l'évolution du stock sur la période ancienne (1892-1929) ne se retrouve pas dans une continuité logique de la chronologie de l'inventaire forestier et une rupture de pente singulière est observable.

On remarque également que les estimations en 1908 semblent élevées par rapport à celles de 1892 et 1929, entraînant une rupture de continuité. Cette surestimation possible a déjà été observée par Audinot (2016) lors de l'inter-comparaison de ces trois statistiques.

Les intervalles de confiance pour le stock total issu d'une imputation de la moyenne pour la partition par département x propriété x structure sont très serrés (**Figure 5.4 ; Tableau 4.2**) et montrent la faible imprécision des estimations de densité moyenne intra-strate à partir des données IFN.

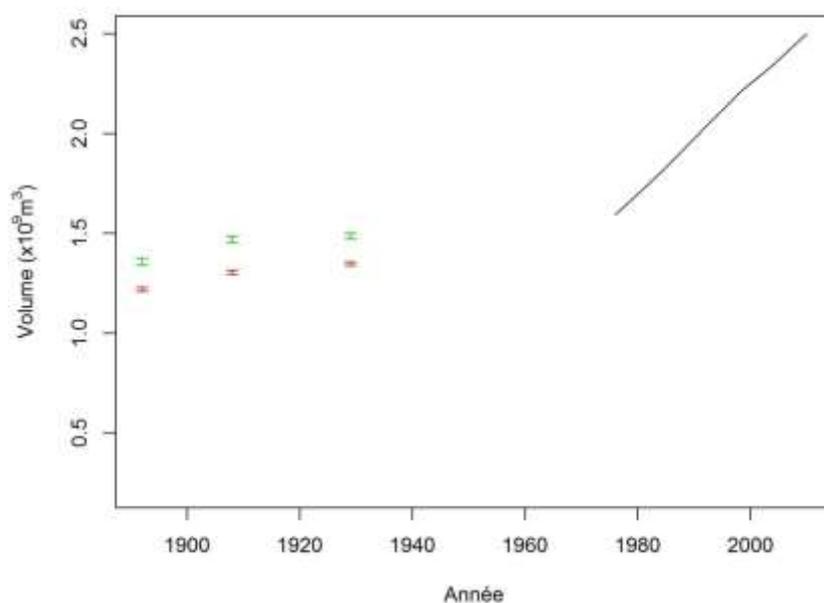


Figure 5.4. Intervalles de confiance pour le volume total estimé en 1892, 1908 et 1929 conditionnellement à la partition département x propriété et structure (moyenne du stock à l'hectare) et selon les périodes de référence pour les données d'inventaire utilisées. En rouge : estimation effectuée à partir des données ancienne méthode de l'inventaire forestier. En vert : estimation effectuée à partir des données nouvelle méthode

La structure ayant un effet important sur les estimations conditionnelles, l'attribution des surfaces des taillis en conversion aux TSF plutôt qu'à une autre classe de structure pourrait expliquer une surestimation de stock. Il a été décidé de tester l'effet d'un transfert des surfaces de « taillis en conversion » identifiées dans la statistique Daubrée dans les différentes structures (taillis, taillis-sous-futaie et futaie). Les résultats obtenus montrent un effet négligeable (**Tableau 5.5**). **Ce choix n'est donc pas à l'origine d'une surestimation du stock.**

Affectation des surfaces des taillis en conversion	Estimation du volume total en 1908 (x 10 ⁶ m ³)
Taillis	1 296
Taillis sous futaie	1 306
Futaie	1 312

Tableau 5.5. Estimation du stock en 1908 selon la structure attribuée aux taillis en conversion identifiés par la statistique Daubrée

2.6.2 Estimations du stock ancien fondées sur une imputation conditionnelle de quantiles de la densité de stock.

Les résultats précédents se fondent sur des données de référence pour la moyenne du volume à l'hectare des strates d'analyse des données IFN. **Cependant, même les estimations précédentes les plus précises semblent hautes relativement au niveau actuel du stock (Figure 5.2).**

La densité à l'hectare a augmenté entre 1976 et 2010 (passant de 121 m³/ha à 162 m³/ha ; partie III). Les forêts du XIX^{ème} siècle sont par ailleurs décrites comme appauvries dans la littérature (Mather *et al*, 1999 ; Husson et Degron, 1999 ; Degron, 1999) suite à une forte pression humaine sur la forêt française, entraînant une large déforestation. On peut donc supposer que la densité forestière à cette époque était faible et que celle-ci au début du XX^{ème} siècle n'était toujours pas aussi élevée que ce qu'elle peut l'être de nos jours. Il est donc vraisemblable que la densité de stock ait augmenté entre le début du siècle et la période contemporaine, et qu'elle entraîne une surestimation des estimations. **Des estimations de stock additionnelles fondées sur une imputation conditionnelle d'une gamme de quantiles de la densité du stock comprise entre 0,10 à 0,60 ont été effectuées, définissant un réseau d'estimations dans lesquelles la trajectoire historique réelle peut se situer (Figure 5.5 ; Tableau 5.6).** Il est à ce titre tout à fait possible que la trajectoire réelle ne passe pas au niveau du même quantile aux trois dates, traduisant un changement de densité des forêts (lié à une capitalisation ou décapitalisation) sur la période 1892-1929.

Il est à noter que, comme précédemment pour les moyennes, il est possible de calculer un intervalle de confiance autour de nos estimations à partir des quantiles, la loi d'échantillonnage des quantiles pouvant être précisée (Gallardo, 2007). Cela n'a pas été calculé dans le cadre de cette thèse.

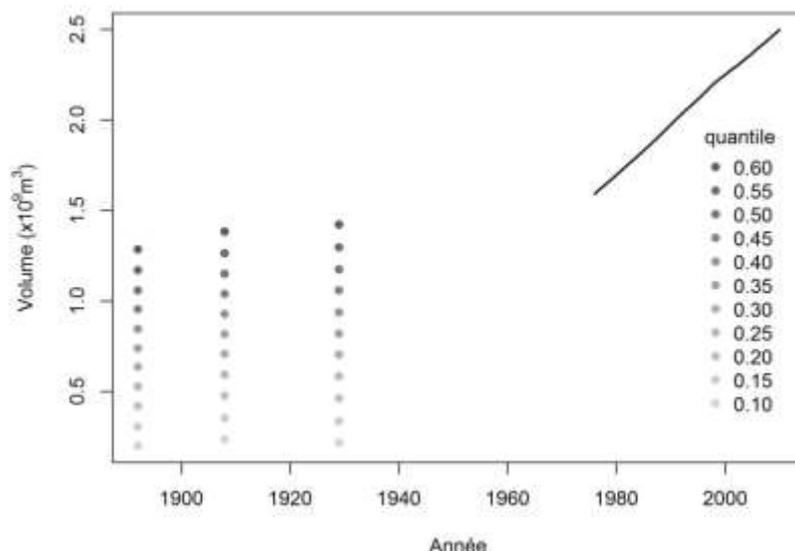


Figure 5.5. Estimations du stock total de bois en 1892, 1908 et 1929 à partir des imputations conditionnelles d'une gamme de quantiles allant de 0.10 à 0.60 discrétisée par pas de 0.05 des valeurs du stock à l'hectare au premier inventaire AM. La courbe noire représente la chronologie de l'évolution du volume forestier entre 1976 et 2010 d'après les données de l'inventaire forestier.

Quantile	Stock estimé (x 10 ⁶ m ³)			Densité de stock estimée (m ³ /ha)		
	1892	1908	1929	1892	1908	1929
0,10	199	234	217	20,3	22,6	20,3
0,15	304	352	334	31,1	34,1	31,3
0,20	417	475	461	42,6	46,0	43,2
0,25	526	592	583	53,7	57,3	54,6
0,30	635	706	702	64,9	68,3	65,8
0,35	739	817	819	75,5	79,1	76,8
0,40	845	927	937	86,3	89,7	87,8
0,45	953	1039	1057	97,4	100,5	99,1
0,50	1058	1149	1173	108,1	111,2	109,9
0,55	1169	1264	1296	119,5	122,3	121,5
0,60	1284	1382	1422	131,2	133,7	133,3

Tableau 5.6. Estimations des stocks et densités de stock anciens (1892, 1908 et 1929) selon le quantile utilisé

Les stocks estimés en 1929 semblent faibles par rapport à ceux de 1908 et doit être lié à la partition utilisée en 1929 qui ne prend en compte que deux types de propriétés (soumis/non soumis) au lieu de 3 pour les autres années (voir 3.3.2).

Les estimations qui, visuellement, semblent les plus plausibles sont celles effectuées à partir des quantiles de 0,20 à 0,40. De plus, il paraît plus plausible que la trajectoire réelle du stock passe par différents niveaux de quantiles pour les 3 années, traduisant une densification des forêts sur la période.

Galbert *et al.* (2015) estime le stock sur pied en 1908 à 900 millions de m³, ce qui correspond à notre estimation effectuée à partir du quantile de 0,40.

3 Reconstitution par simulation de l'évolution du stock sur pied depuis le début du XX^{ème} siècle

3.1 Principe de la reconstitution historique des stocks par simulation

La reconstitution par simulation de l'évolution du stock de bois sur un horizon séculaire a été opérée selon les principes suivants.

L'idée centrale repose sur : 1) l'utilisation (et la paramétrisation) d'un modèle de cinétique moyenne d'accumulation de stock net à l'hectare (toutes forêts confondues), 2) appliqué à une surface ancienne des forêts qui soit la plus proche possible du « minimum forestier » de la transition forestière (situé dans la première moitié du XIX^{ème} siècle, Mather *et al.*, 1999), et qui s'accroît progressivement selon la cinétique d'augmentation des surfaces, raisonnablement documentée depuis le XIX^{ème} siècle (Brénac, 1984), 3) avec une initialisation de la distribution du stock à cette date ancienne. Ce modèle phénoménologique ne représente donc pas les processus de la dynamique forestière (recrutement, croissance, mortalité et prélèvements tels qu'analysés dans le chapitre 2 de cette thèse). Il s'agit par ailleurs au plan technique d'un modèle reposant sur le principe d'une double somme : une première sommation de stock sur l'horizon de temps, conditionnelle à une surface initiale donnée, une seconde sommation sur les surfaces, qui augmentent progressivement.

Par minimisation approchée d'un critère d'erreur entre reconstitutions historiques de stock de bois et les simulations, on cherche à estimer les paramètres associés : 1) au modèle de cinétique d'accumulation de stock, 2) à l'initialisation de la distribution du stock à l'hectare, et qui permettent la simulation la plus proche des observations.

Par ailleurs, une analyse d'incertitude est conduite : 1) sur la forme du modèle de cinétique d'accumulation, 2) sur les quantiles de stock historiques à considérer pour la minimisation du critère, 3) sur certaines estimations historiques de surface, pour un double objectif : préciser au mieux la forme du modèle et sa paramétrisation, et préciser simultanément l'identification des quantiles de stock historiques estimés les plus plausibles, au sens de leur compatibilité à la simulation.

Bien que cela ait été initialement envisagé, nous n'avons donc pas considéré les modèles démographiques à grande échelle de la dynamique forestière (Wernsdörfer *et al.*, 2012), permettant l'explicitation des flux et de la structure diamétrique du stock, afin de commencer par une première étape simple, permettant de tester des hypothèses fondamentales.

3.2 Reconstitution de la dynamique historique des surfaces

3.2.1 Surfaces forestières avant l'inventaire forestier national (1961)

Dans un premier temps, une reconstitution la plus précise possible de l'évolution des surfaces forestières depuis la transition a été effectuée. Elle se base sur trois sources fondamentales : l'article de Brénac (1984), celui de Cinotti (1996), et sur nos estimations historiques issues des statistiques anciennes (qui contiennent par exemple des informations additionnelles, comme les surfaces de 1882 ou 1862 ; **Tableau 5.7**). Cette reconstitution est complétée par les données de l'inventaire forestier.

Les données anciennes (c'est-à-dire autres que celles de l'inventaire forestier national) sont constituées de :

- L'estimation de Young à partir d'une fraction (140/180) des cartes de Cassini. Brenac (1984) reprend cette estimation en y rajoutant une estimation de la surface boisée de la Corse et du Comté de Nice. L'estimation totale donne une surface forestière de 8 millions d'hectares. Cette estimation historique est considérée comme négativement biaisée,
- L'estimation de la surface forestière en 1830 par Cinotti (1996), **c'est-à-dire à une période voisine du minimum forestier supposé (Mather *et al.*, 1999)**. Celui-ci considère que cette surface était comprise entre 8,9 et 9,5 millions d'hectares. Nous avons donc choisi de la fixer à la moyenne, 9,2 millions d'hectares. Dans la même étude, cette surface est considérée comme inchangée entre 1788 et 1846. Il a donc été décidé de poser par hypothèse de travail **une estimation de la surface forestière qui est de 9,2 millions d'hectares en 1850**.
- L'enquête Mathieu de 1878 qui donne une surface forestière de 9 185 310 hectares hors Alsace-Moselle. Cette statistique a été corrigée de la surface forestière de l'Alsace-Moselle en y ajoutant une estimation (446000 ha) provenant d'une statistique forestière de l'Alsace-Lorraine (Hüffel, 1920). Au total, la surface forestière de 1878 a été estimée à 9660000 ha. Elle est réputée être biaisée négativement pour la forêt privée.
- Les données de statistiques agricoles (1862, 1892 et 1929). La statistique agricole de 1892, en plus de renseigner sur la surface forestière en 1892, apporte des informations

sur cette même surface en 1882. De la même façon que pour 1878, les données des statistiques de 1882 et 1892 ont été corrigées de 446 000 ha pour l'Alsace-Moselle.

- La statistique Daubrée qui donne une vision de la surface forestière en 1908. Cette statistique a été corrigée des données d'Alsace-Moselle, région annexée au début du XX^{ème} siècle, en utilisant les données d'une statistique allemande (Forststatistik, 1908).
- L'estimation de la surface forestière de 1956-59 par l'industrie papetière, effectuée « à dire d'expert » (Brénac, 1984), et considérée comme étant négativement biaisée

Bien que très utiles pour des reconstitutions sur le long terme, les statistiques anciennes ont l'inconvénient de ne pas présenter de définition explicite de la forêt.

Les données des statistiques agricoles de 1882 et 1892 donnent la taille des périmètres de reboisements RTM. Cependant, la totalité de ces surfaces n'est pas boisée. Elles ont donc été retranchées à la surface totale et une estimation de la surface boisée RTM à ces deux dates a été effectuée. En 1900, les boisements RTM, commencés en 1860, sont estimés à 88 000 ha (78 500 ha en 1897 selon Parde, 1998). Pour notre étude, il a été considéré que ces boisements ont été effectués de façon homogène dans le temps et les statistiques agricoles ont été corrigées de 44 000 ha en 1882 et 88 000 ha en 1892 amenant à une surface totale de 9 844 500 et 9 786 500 ha respectivement.

Date	Estimation (ha)	Source	Commentaire
1788	8000000	Estimation d'Arthur Young dans Brenac 1984	Initialement 7600000 ha corrigée de la Corse estimée à 400000 ha
1830	9200000	Cinotti 1996	
1850	9200000	Cinotti 1996	
1862	9320000	Statistique agricole de 1862	
1878	9660000	Enquête Mathieu dans Brenac 1984	9200000 ha + 446000 ha pour l'Alsace-Moselle (Hüffel, 1920) 945500 ha – 100000 ha de périmètres + 44000ha de boisements RTM + 446000 ha pour l'Alsace-Moselle (Hüffel, 1920)
1882	9844500	Statistique agricole de 1892	
1892	9786500	Statistique agricole de 1892	952000 ha – 266000 ha de périmètres + 88000 ha de boisements RTM + 446000 ha pour l'Alsace-Moselle (Hüffel, 1920)
1908	10334000	Statistique Daubrée de 1908	Corrigée de la ForstStatistik 1908 allemande
1929	10670000	Statistique agricole de 1929	
1958	11120000	Recensement provisoire dans Brenac 1984	

Tableau 5.7. Estimations des surfaces forestières françaises historiques depuis 1788

3.2.2 Surfaces forestières de la période couverte par l'inventaire forestier national

De la même manière que dans la partie III, les données des inventaires forestiers départementaux ont été agrégées par interpolation annuelle, en utilisant toutes les données AM disponibles et une moyenne des données de 2006 à 2014 pour la NM. Cette chronologie commence en 1976, date à laquelle 80% des départements avaient déjà eu un premier inventaire.

3.2.3 Adaptation et lissage de la chronologie des surfaces par ajustement d'un modèle de régression polynomial

Une courbe polynomiale a ensuite été ajustée par régression linéaire afin d'obtenir une trajectoire lissée et temporellement continue des surfaces. Des polynômes de différents degrés

ont été ajustés à la courbe en essayant de trouver le polynôme de plus faible degré s'ajustant le mieux possible aux données, et principalement aux données de l'inventaire forestier.

La série chronologique brute met en évidence la trajectoire accélérée de la surface forestière française. Il a été choisi de ne pas utiliser la donnée provenant de l'estimation de Young (1788) ni celle provenant du recensement de papèterie de 1958. Ces deux surfaces paraissant discutables, à la fois de par la littérature à leur sujet (Brenac, 1984 ; Vallauri *et al.*, 2012), et par le constat qu'elles ne rentrent pas dans une logique de continuité de l'évolution de la surface forestière française (**Figure 5.6**).

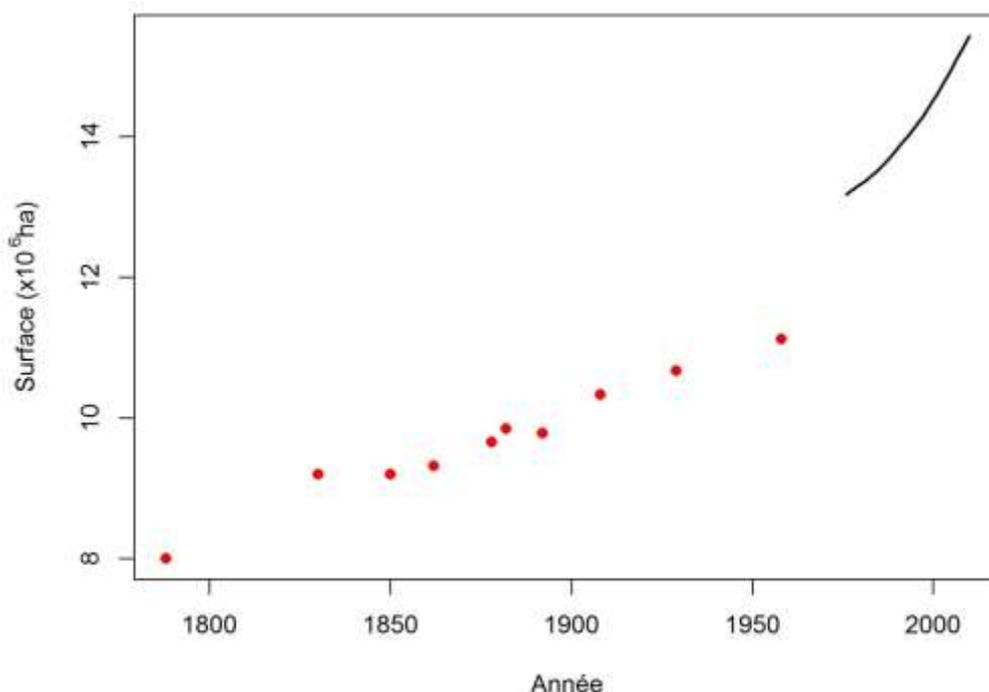


Figure 5.6. Chronologie brute de l'évolution de la surface forestière française entre 1788 et 2010 d'après des estimations anciennes (en rouge) et les données de l'inventaire forestier national (en noir).

La chronologie résultante (**Figure 5.6**) montre une forte accélération de l'augmentation des surfaces forestières depuis la mise en place de l'inventaire forestier. Cette accélération est peut-être due à une sous-estimation des surfaces forestières au début du XX^{ème} siècle, résultat d'une mauvaise estimation des surfaces forestières privées à cette époque. A titre d'analyse d'incertitude, un essai d'augmentation de ces surfaces de respectivement 500 000 et 1 000 000 ha a été effectué et montre une évolution qui semble alors plus continue lorsqu'elle est corrigée (**Figure 5.7**).

Nous avons donc décidé d'introduire une composante additionnelle à l'analyse de sensibilité associée à cet essai de simulation, en utilisant les données brutes et les données augmentées de 1 000 000 ha.

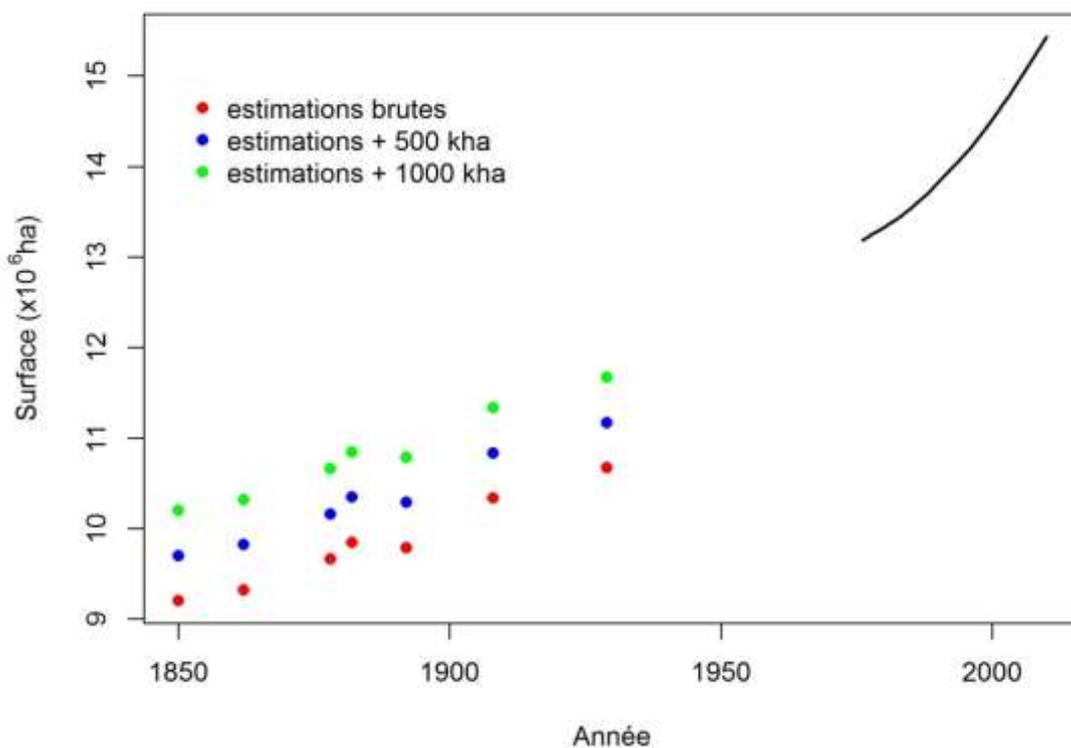


Figure 5.7. Chronologie de l'évolution de la surface forestière française entre 1850 et 2010 d'après les données de l'inventaire forestier national (en noir) et les données anciennes brutes (en rouge), ou augmentées de 500 (en bleu) ou 1 000 (en vert) kha

Pour les données brutes, un polynôme de degré 3 a été sélectionné (4 ; **Figure 5.8**) :

$$S(t) = 0,6328 t^3 - 3454,7 t^2 + 6.10^6 t - 4.10^9 \quad (8)$$

Pour les données corrigées de 1 000 kha, un polynôme de degré 4 (5 ; **Figure 5.9**) a été sélectionné :

$$S(t) = 0,0194 t^4 - 148,3 t^3 + 424648 t^2 - 5.10^8 t + 3.10^{11} \quad (9)$$

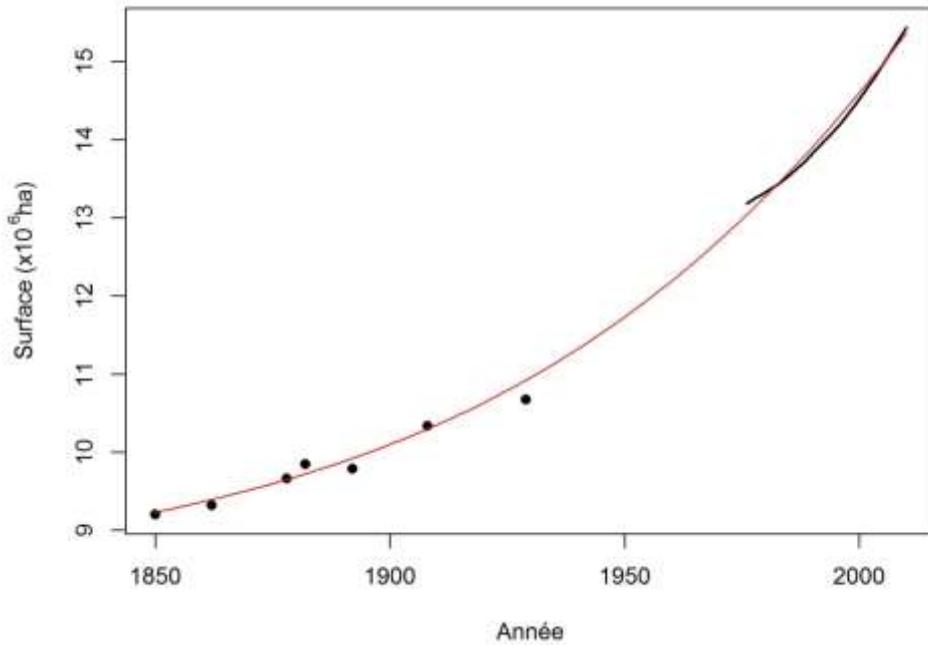


Figure 5.8. Lissage polynomial continu des surfaces forestières historiques brutes entre 1850 et 2010 (en rouge) et des estimations de la surface forestière française d'après l'inventaire (noir)

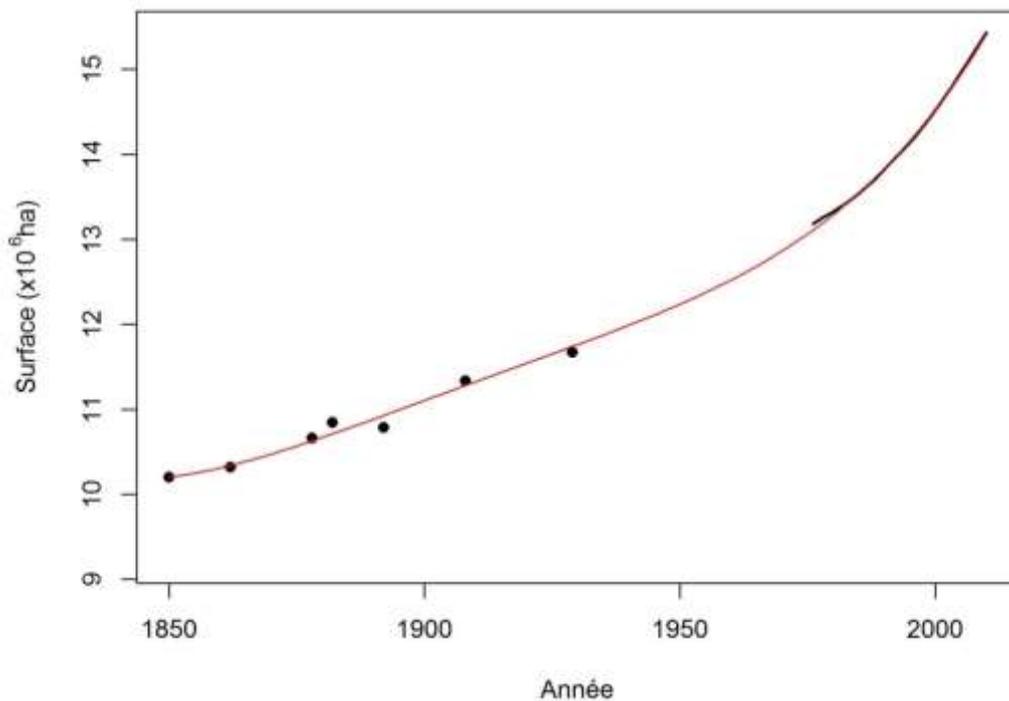


Figure 5.9. Lissage polynomial des surfaces entre 1850 et 2010 (en rouge) et valeurs des estimations de la surface forestière française (noir). Les surfaces avant la mise en place de l'inventaire forestier national ont été corrigées de 1000 kha

3.3 Modélisation de l'évolution du volume forestier depuis 1850

La reconstitution de l'évolution du stock sur pied de la forêt française se base sur l'utilisation d'un modèle prenant en compte l'évolution des surfaces et la densification du stock de bois moyen des forêts au cours du temps. Plusieurs modèles ont été mis en place et les résultats ont été comparés aux données IFN et aux estimations des stocks anciens.

3.3.1 Présentation du modèle

Le modèle mis en place est un **modèle discret**, permettant une facilité de calcul, qui prend en compte une forêt initiale de surface S_0 et de densité D_0 , et que l'on initialise en 1850.

Par la reconstitution historique de la surface forestière, on a chaque année une estimation de la surface des nouvelles forêts (S_{new}) tandis que les surfaces préexistantes accumulent du stock de bois.

Différents modèles de cinétique d'accumulation de stock net, reliant la densité de stock de bois à l'âge des surfaces forestières ont été testés.

L'hypothèse de travail de départ a été que le stock net de bois à l'hectare s'accumule selon une fonction concave saturante (Pretzsch, 2009), selon une observation classique en forêt gérée. Néanmoins, des simulations exploratoires, confrontées aux observations historiques, nous ont progressivement amené à considérer des hypothèses alternatives a priori moins réalistes, associées à une accumulation accélérée de stock.

Finalement, trois fonctions d'accumulation de comportement très contrasté ont été considérées : une fonction concave saturante à deux paramètres, avec le modèle monomoléculaire (ou de « Mitscherlich » ; Zeide, 1993 ; Franc *et al.*, 2000) reposant sur une fonction exponentielle négative (**Figure 5.10**), un modèle simplement linéaire à un seul paramètre de pente, (**Figure 5.11**) et un modèle sigmoïde saturant, à asymptote horizontale. Le choix de ce modèle résulte d'une double logique : 1) s'autoriser des cinétiques d'accumulation convexes, dans le contexte de nos essais exploratoires, 2) tout en bornant le phénomène d'accumulation de stock, pour que les simulations restent vraisemblables. Le modèle de Hossfeld à 3 paramètres a été choisi comme modèle sigmoïde (**Figure 5.12**). Il en existe de nombreux (Zeide ; 1993) mais plusieurs d'entre eux présentent le défaut d'un démarrage trop lent (demi-tangente horizontale, parmi lesquels les modèles de Chapman-Richards ou de Korf/Lundquist-Matérn), et ce modèle est à ce titre plus réaliste sur son démarrage au temps initial (Bontemps *et al.* 2009).

3.3.2 Modèles d'accumulation de stock net et paramétrisations associées

3.3.2.1 Modèle monomoléculaire

Le modèle monomoléculaire traduit une densification plus rapide des jeunes surfaces forestières, et présente une asymptote représentant une densité maximale (D_{max}) des peuplements, plausible sous l'hypothèse classique d'auto-éclaircie des peuplements (Skovsgaard et Vanclay, 2008). Sa paramétrisation initiale repose sur un paramètre de forme et un paramètre d'asymptote :

$$D(\hat{age}) = D_{max} \left(1 - \frac{1}{e^{c \cdot \hat{age}}} \right) \quad (10)$$

En posant t_{max} , l'âge auquel le peuplement atteint 99% de la densité maximale, on obtient une estimation de la constante c :

$$c = -\frac{\ln(1-99\%)}{t_{max}} \quad (11)$$

Le modèle peut donc être reparamétré selon une densité maximale et une constante de temps: D_{max} et t_{max} .

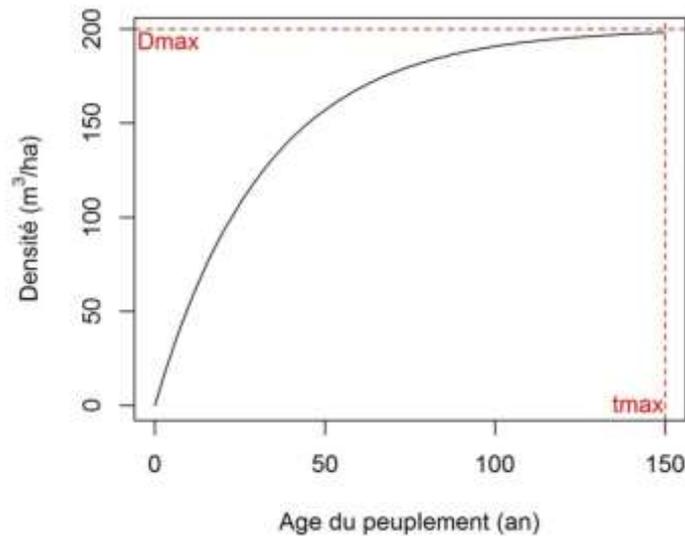


Figure 5.10. Densité de stock de bois d'une surface forestière en fonction de son âge estimé par le modèle mononucléaire avec une densité maximale (D_{max}) de 200 m³/ha et un âge auquel le peuplement atteint 99% de la densité maximale (t_{max}) de 150 ans.

3.3.2.2 Modèle linéaire

Le modèle linéaire est le modèle le plus simple. Avec un tel modèle, on postule que l'expansion des forêts se fait de façon constante et illimitée, quel que soit l'âge des surfaces forestières :

$$D(\text{âge}) = \frac{D_{\max}}{t_{\max}} \cdot \text{âge} \quad (12)$$

Avec D_{\max} (m^3/ha) la densité maximale et t_{\max} le temps pour atteindre cette densité. Le rapport entre D_{\max} et t_{\max} constitue la pente du modèle linéaire.

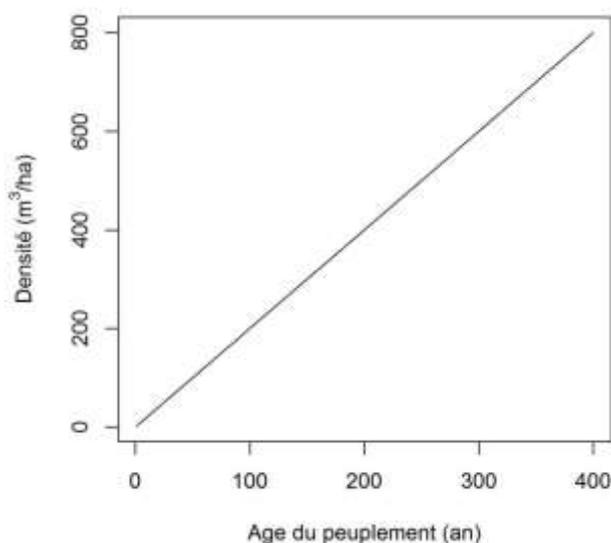


Figure 5.11. Densité du peuplement en fonction de son âge estimé par le modèle linéaire avec une pente de 2

3.3.2.3 Modèle de Hossfeld

Enfin, le modèle de Hossfeld (Zeide 1993, Franc *et al.*, 2000) présente à la fois une densification lente des jeunes surfaces qui va en s'accroissant, un point d'inflexion au-delà duquel l'accumulation de stock ralentit, et une densité maximale finale. Ce modèle est originellement utilisé pour modéliser la croissance en hauteur des arbres ou d'un peuplement (Elfving, 1997) :

$$\frac{dx}{dt} = rx^{1-m} \left(1 - \frac{x}{K}\right)^{1+m} \quad (13)$$

Il peut être reparamétrisé explicitement par rapport aux quantités cibles qui nous intéressent :

$$D(t) = \frac{D_{max}}{D_{max} \left[\left(\left(\frac{D_{max} - D_{inf}}{D_{max} D_{inf}} \right)^{\frac{2D_{inf} - D_{max}}{D_{max}}} - C \right) \frac{t}{t_{Dinf}} + C \right]^{\frac{D_{max}}{2D_{inf} - D_{max}}} + 1} \quad (14)$$

Où D_{max} (m³/ha) est la densité maximale, D_{inf} (m³/ha) la densité de la forêt au niveau du point d'inflexion, t_{Dinf} , le temps que met une surface forestière avant d'atteindre ce point d'inflexion et C qui dépend de D_{ini} (m³/ha) la densité initiale (qui est celle d'une jeune forêt nouvellement installée) :

$$C = \left(\frac{1}{D_{ini}} - \frac{1}{D_{max}} \right) \left(\frac{2D_{inf}}{D_{max}} - 1 \right) \quad (15)$$

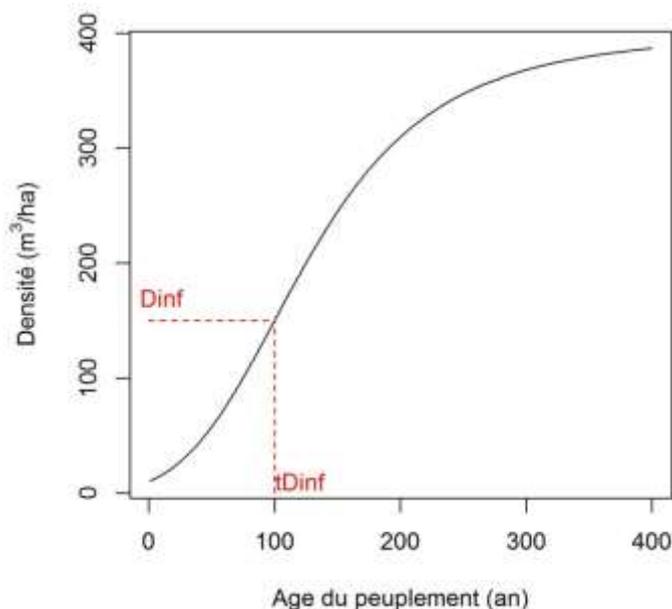


Figure 5.12. Densité de stock de bois d'une surface forestière en fonction de son âge, simulée par le modèle de Hossfeld avec une densité maximale de 400 m³/ha, une densité au point d'inflexion de 150 m³/ha (Dinf), un âge au point d'inflexion de 100 ans (tDinf) et une densité initiale de 10 m³/ha.

3.3.2.4 Ajustement des paramètres des modèles

Des gammes de valeurs larges des paramètres des différents modèles ont été testées et les résultats des simulations ont été comparés aux volumes de l'inventaire forestier (1976, 1986, 1996 et 2010) et aux volumes anciens estimés (1892, 1908 et 1929). Les valeurs attribuées aux différents paramètres sont présentées dans le **Tableau 5.8**.

Modèle	Paramètre	Valeurs attribuées
Monomoléculaire	D_{\max}	De 100 à 300 m ³ /ha avec un pas de 50 m ³ /ha
	t_{\max}	De 100 à 250 ans avec un pas de 50 ans
Linéaire	D_{\max}	De 100 à 300 m ³ /ha avec un pas de 50 m ³ /ha
	t_{\max}	De 100 à 250 ans avec un pas de 50 ans
De Hossfeld	D_{\max}	De 300 à 500 m ³ /ha avec un pas de 100 m ³ /ha
	D_{ini}	2,5, 5 ou 10 m ³ /ha
	D_{inf}	De 51 à 201 m ³ /ha avec un pas de 50 m ³ /ha
	$t_{D\text{inf}}$	De 50 à 250 ans avec un pas de 50 ans

Tableau 5.8. Valeurs prises par les différents paramètres. Dans le cadre de notre étude, une autre paramétrisation du modèle de Hossfeld a été utilisée dans un premier temps (Annexe V.2), ne nous permettant pas d'utiliser des chiffres ronds pour les valeurs de D_{inf} .

3.3.3 Conditions initiales et analyse de sensibilité

La surface initiale des forêts françaises correspond à la surface en 1850 obtenue grâce aux courbes empiriques (avec et sans augmentations de 1000 kha). Deux valeurs possibles ont donc été utilisées (**Figures 5.8 et 5.9**).

Des estimations sur la densité initiale de la forêt française en 1850 ont été effectuées. La densité en stock des forêts françaises a augmenté entre 1976 et 2010 (chapitre II) passant de 121 à 162 m³/ha en moyenne. De plus, dans la littérature (Mather, 1999), une diminution forte et inquiétante de la ressource en bois au début du XIX^{ème} siècle est décrite, la densité devait donc être encore plus faible à cette époque qu'en 1908. La reconstitution du stock au début du siècle permet d'estimer ce stock à moins de 1,3 milliards de mètres cubes pour une surface de 10 millions d'hectares. Ce qui donne une densité moyenne de moins de 126 m³/ha. **La densité initiale de notre étude a donc été choisie pour être inférieure à cette densité. Une analyse de sensibilité sur la densité initiale a été effectuée en utilisant trois valeurs moyennes : 25, 50 et 100 m³/ha.**

Cette densité initiale de stock de bois a été complétée de la **structure en âge des surfaces forestières de 1850**. Deux alternatives ont alors été considérées :

- la forêt initiale est considérée comme homogène, avec un seul âge qui est calculé pour toute la forêt, à partir du modèle d'accumulation de stock postulé.
- la forêt initiale est hétérogène et est séparée en cinq classes de densité de stock (et donc d'âges) différentes, et présentant une **distribution classique asymétrique en J**. La part de la surface attribuée à ces forêts est de 50, 20, 15, 10 et 5% de la surface

totale pour les cinq classes de densité de stock (D1, D2, D3, D4 et D5 respectivement ; **Tableau 5.9**) dans l'ordre de densité croissante.

D0 (m ³ /ha)	Densité des groupes composant la forêt (m ³ /ha)				
	D1	D2	D3	D4	D5
25	12,5	25	37,5	50	62,5
50	25	50	75	100	125
100	50	100	150	200	250

Tableau 5.9. Densité de stock des cinq classes de densité (D1, D2, D3, D4 et D5) composant la surface forestière en 1850 en fonction de la densité initiale (D0)

3.3.4 Mesure de la contribution à l'évolution en stock des forêts d'origine

Grâce au modèle, il a été possible de séparer la contribution des « nouvelles forêts » (présentes depuis 1850, au moins) de celle des anciennes (qui se sont établies après 1850) au stock de bois dans la forêt au cours du temps, afin d'explorer leur part respective potentielle dans l'expansion totale.

3.4 Résultats des simulations

3.4.1 Sélection du modèle

Modèle monomoléculaire

Les simulations conduites avec le modèle monomoléculaire montrent que ce modèle ne permet pas de reconstituer la dynamique passée des forêts, à aucune condition sur des gammes de valeurs larges des deux paramètres D_{max} et t_{max} (**Figure 5.13**). En effet, il ne permet pas de retrouver simultanément ni le même niveau ni la même pente que celle observée dans les données IFN. De plus, l'évolution du stock est beaucoup trop rapide au début du siècle, entraînant une très forte surestimation du stock. On peut aussi remarquer une densité à l'hectare qui diminue dans la période actuelle, ce qui ne correspond pas aux observations de l'IFN.

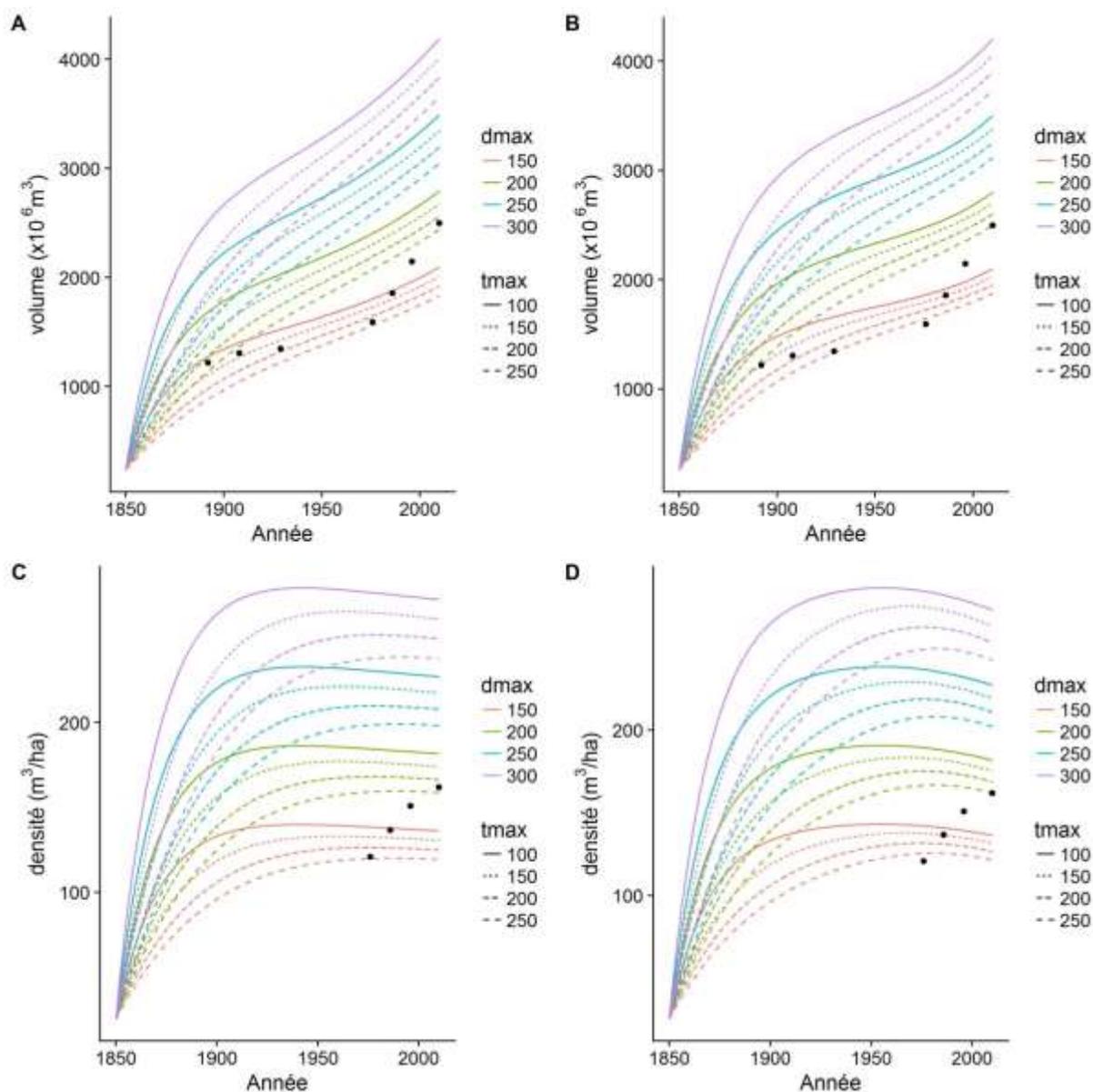


Figure 5.13. Simulations de volume et de volume par hectare avec le modèle monomoléculaire pour des surfaces forestières brutes (A, C) ou modifiées (+ 1000 kha pour les surfaces anciennes ; B, D) et un état initial hétérogène avec une densité initiale moyenne de 25 m³/ha. dmax correspond à la valeur de la densité à l'asymptote (D_{max}) et tmax le temps qu'il faut pour atteindre 99% de dmax (t_{max}).

Modèle linéaire

Le modèle linéaire, qui repose sur une hypothèse d'accumulation constante et illimitée du stock à l'hectare, permet, à certaines conditions de valeur de la pente, de retrouver le niveau d'augmentation des stocks observé depuis 1976 ainsi que la tendance d'évolution des densités de stock (**Figure 5.14**), mais surestime fortement le rythme de cette accumulation au début du

siècle. De plus, ce modèle montre une évolution absolue trop rapide du stock et entraîne, lui aussi, une surestimation forte du stock sur pied.

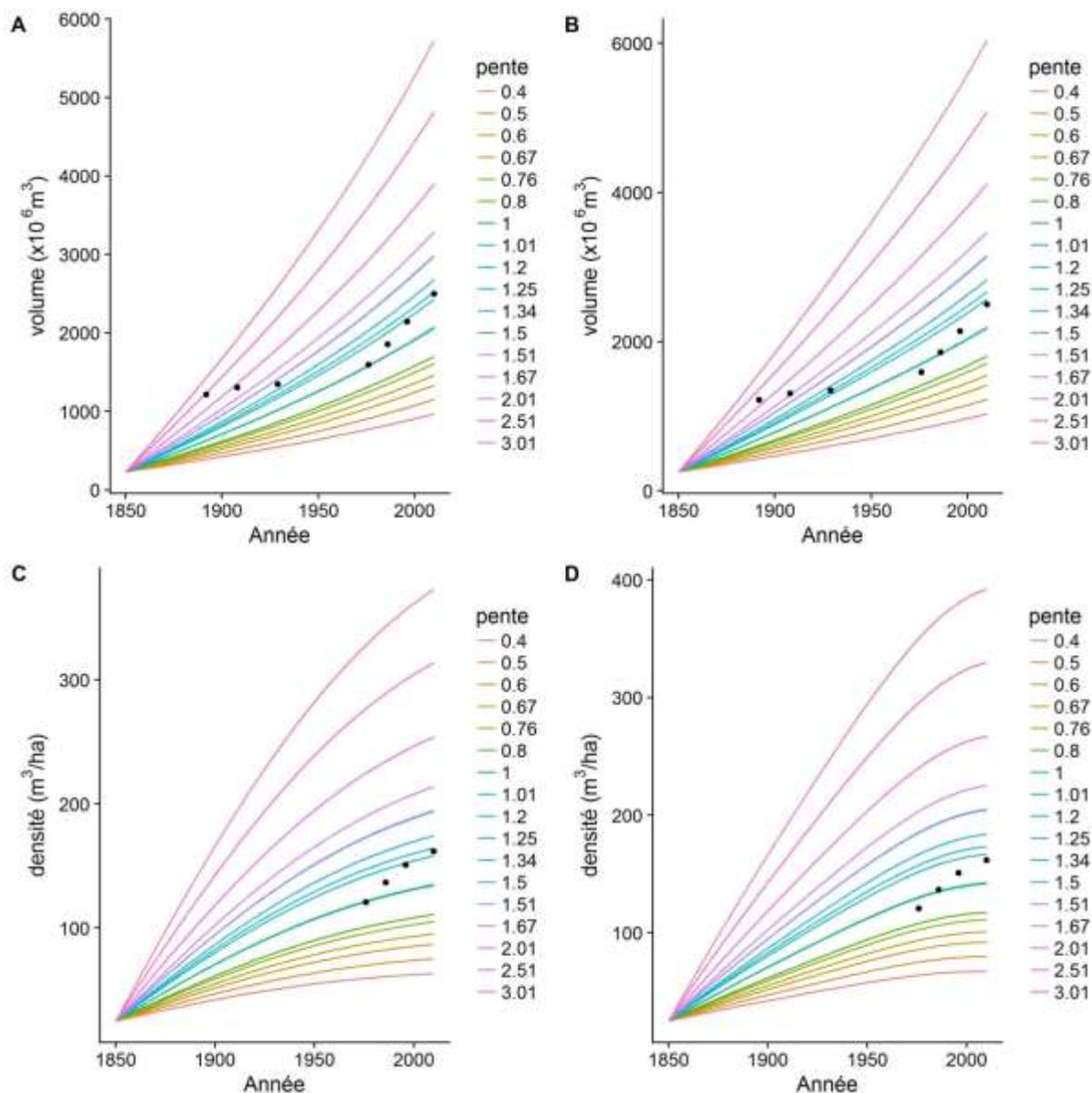


Figure 5.14. Simulations de volume et de volume par hectare des modèles pour une surface brutes (A, C) ou modifiées (+ 1000 kha pour les surfaces anciennes ; B, D), une densité qui suit une loi linéaire et un état initial hétérogène avec une densité initiale moyenne de 25 m³/ha

Modèle sigmoïde

Les simulations avec le modèle de Hossfeld présentent en partie des trajectoires accélérées, compatibles avec les estimations historiques de stock. Ce modèle permet de retrouver la tendance accélérée de l'évolution du stock et celle décélérée de l'évolution de la densité (**Figure 5.15**). Cela est en particulier vrai pour des temps au point d'inflexion qui atteignent les 150 ans, c'est-à-dire pour une accumulation essentiellement accélérée du stock net sur une durée très longue. **Cependant, et à nouveau il n'est pas possible de trouver une trajectoire proche de l'ensemble des observations sur l'espace des paramètres. Ces trajectoires simulées suggèrent que l'estimation des stocks fondée sur une imputation de la moyenne de densité de stock est élevée.**

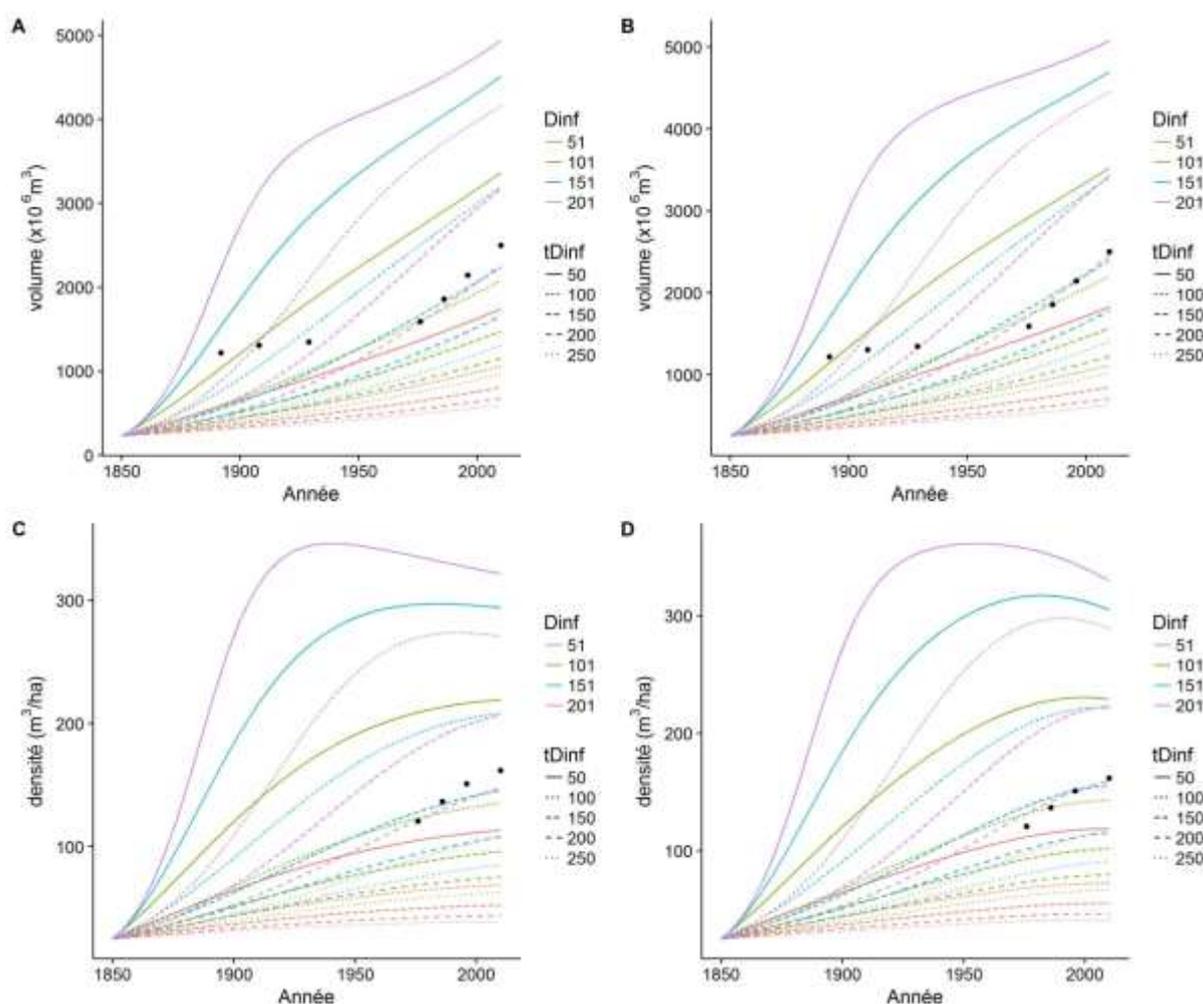


Figure 5.15. Simulations de volume et de volume par hectare des modèles pour une surface brutes (A, C) ou modifiées (+ 1000 kha pour les surfaces anciennes ; B, D), une accumulation de stock à l'ha qui suit une loi de Hossfeld de densité à l'origine de 10 m³/ha et un état initial homogène avec une densité initiale moyenne de 25 m³/ha. Dinf correspond à la densité au point d'inflexion et tDinf l'âge au point d'inflexion.

3.4.2 Co-estimation des paramètres du modèle d'évolution du stock et des valeurs quantiles de stocks historiques de bois (modèle de Hossfeld).

Afin d'identifier les paramétrisations du modèle de Hossfeld qui représentent le mieux l'évolution du stock observé, l'erreur de prédiction (RMSEP : Root Mean Square Error of Prediction) a été calculée pour chaque simulation entre les simulations et le stock observé par l'IFN (stock réel) en 1976, 1986, 1996 et 2010 ainsi que les stocks calculés par moyenne ou à partir des quantiles de 0,10 à 0,60 en 1892, 1908 et 1929. Seule la distribution classique asymétrique du stock à l'hectare initial a été étudiée ici :

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum_{nt}(V_{sim}(t)-V_{obs}(t))^2}{nt}} \quad (16)$$

Où $V_{sim}(t)$ correspond au volume simulé à la date t et $V_{obs}(t)$ le volume relevé par l'inventaire forestier en 1976, 1986, 1996 et 2010 ainsi que les volumes « reconstitués » du début du siècle et nt le nombre de points de comparaisons (ici : 7).

La densité moyenne de la forêt pouvant avoir changé entre les inventaires anciens, toutes les combinaisons possibles de quantiles et de moyennes ont été testées.

Ainsi, l'ensemble de paramètres et des conditions initiales qui conduisent aux simulations les plus proches de l'évolution du volume forestier total (*i.e.* celui qui minimise la RMSEP), a été sélectionné.

Les dix ensembles de paramètre présentant les plus faibles RMSEP sont détaillés dans le **Tableau 5.10**.

Plusieurs enseignements s'en dégagent :

- 1) De façon très générale, la proximité forte entre les meilleures paramétrisations suggère une robustesse du modèle, qui a été voulu extrêmement simple, permettant d'exclure a priori l'existence de minima locaux,
- 2) le temps d'arrivée au point d'inflexion est important (entre 150 et 250), et le plus élevé pour les meilleures simulations. **Depuis 1850, on se trouve donc dans une phase où la capitalisation de l'unité surfacique de forêt se ferait essentiellement selon une trajectoire accélérée,**
- 3) La densité au point d'inflexion, couramment entre 150 et 200 m³/ha, est élevée, et correspond à **l'ordre de grandeur des niveaux de densité observés couramment dans la forêt française aujourd'hui.**
- 4) la densité maximale est autour de 400-500 m³/ha et est donc élevée. A titre de comparaison, aucun pays en Europe ne montre une densité de stock supérieure à

320 m³/ha (Forest Europe, 2015). Toutefois, cette estimation est très modèle-dépendante, et l'absence de données pour étayer la valeur de ce paramètre conduit à ne pas s'y attarder,

- 5) Au plan des éléments entrant dans l'analyse d'incertitude associée à ce modèle, il ressort : a) que c'est **la densité initiale de stock de la forêt la plus faible (25 m³/ha) qui conduit à l'erreur la plus faible**, suggérant une extrême faiblesse du stock en 1850, b) **que c'est le scénario de surface systématiquement augmenté de 1 Mha aux dates anciennes qui fournit les meilleures simulations**, confirmant qu'un biais négatif dans ces statistiques est plausible (voir section 4.2.3 et **Figures 5.8 et 5.9**).
- 6) enfin, au plan des estimations conditionnelles des stocks historiques, les meilleures simulations **correspondent à une combinaison des stocks reconstitués à partir des quantiles de niveau 0.2 ou 0.3 de la densité de stock de l'AM pour la statistique de 1892, de 0.3 pour celle de 1908 et de 0.4 ou 0.5 pour la statistique de 1929 (Tableau 4)**, c'est-à-dire des quantiles de rang inférieur à ceux des valeurs moyennes ou centrales. **Ces quantiles suggèrent qu'au début du siècle, les forêts étaient, en moyenne, moins capitalisées que les forêts actuelles (635 millions de m³ et 64,9 m³/ha en 1892 pour le quantile 0,30 et 706 millions de m³ et 71,8 m³/ha en 1908 pour le quantile 0,30; Tableau 5.6).**

Modèle	Modèle de							
	Dinf (m ³ /ha)	tDinf (ans)	Dmax (m ³ /ha)	Dini (m ³ /ha)	surfaces forestières (0 ou 1000)	D0 (m ³ /ha)	Combinaison de quantiles	RMSEP (x 10 ⁶ m ³ /ha)
1	201	250	400	2,5	+ 1000	25	0,30 – 0,30 – 0,40	91,90
	201	250	400	2,5	+ 1000	25	0,20 – 0,30 – 0,40	96,85
2	201	200	500	5	+ 1000	25	0,30 – 0,30 – 0,40	100,42
3	151	150	400	10	+ 1000	25	0,30 – 0,30 – 0,40	102,12
4	151	150	400	5	0	25	0,30 – 0,30 – 0,40	107,88
5	151	150	300	10	0	25	0,20 – 0,30 – 0,40	109,63
	151	150	500	2,5	0	25	0,30 – 0,30 – 0,50	110,93
	151	150	400	5	0	25	0,30 – 0,30 – 0,50	111,25
	151	150	400	10	+ 1000	25	0,30 – 0,30 – 0,50	111,28
	201	200	500	5	+ 1000	25	0,30 – 0,30 – 0,50	111,43

Tableau 5.10. Les dix jeux de paramètres minimisant la RMSEP établie entre les simulations et les stocks estimés par l'inventaire forestier national en 1976, 1986, 1996 et 2010 ainsi que les volumes reconstitués aux trois dates anciennes à partir des moyennes ou des quantiles. En gris : les cinq jeux de paramètres minimisant la RMSEP.

L'ensemble de simulations du stock de bois de la forêt française depuis 1850 est indiqué en **figure 5.16**, et distingue les meilleures simulations. Les 5 courbes de densification du stock à l'hectare correspondant à ces 5 ensembles de paramètres sont fournies en **figure 5.17**. Elles permettent d'illustrer l'accélération très lente de l'accumulation de stock net à l'hectare sur un horizon temporel d'au moins 150 ans (c'est-à-dire de 1850 à nos jours), ainsi que la prédiction – selon ce modèle – qu'un ralentissement de cette expansion ne se produirait pas avant 200 à 300 ans après 1850 (c'est-à-dire entre 2050 et 2150). L'ensemble de ces éléments suggèrent une dynamique de très long terme, et une cinétique d'accumulation qui sort du champ des faits usuellement acceptés pour des forêts gérées.

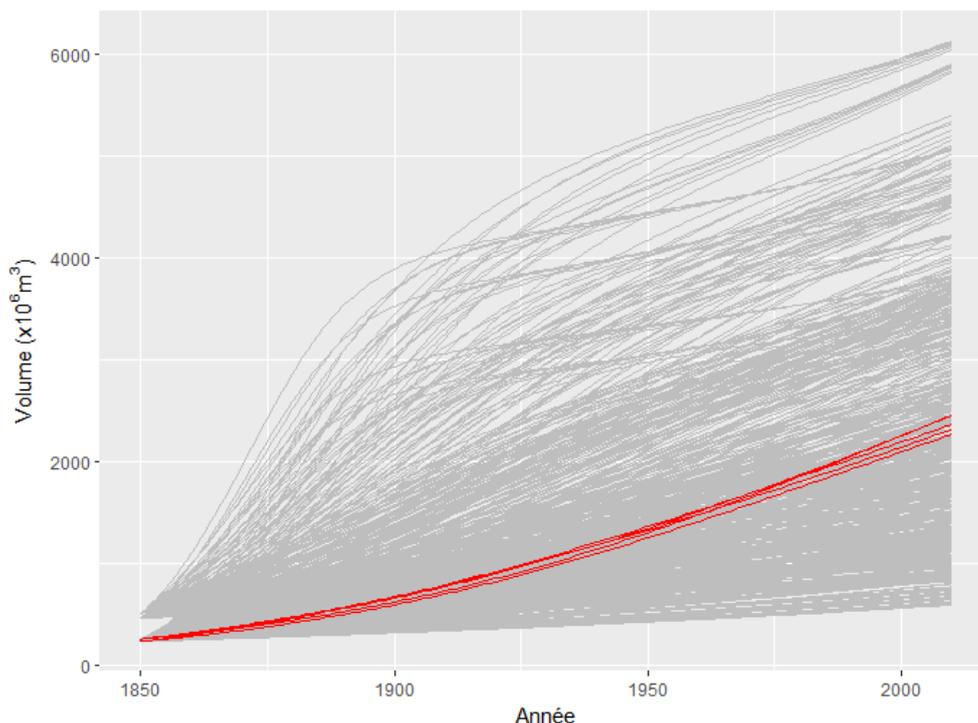


Figure 5.16. Ensemble de simulations pour l'évolution du stock de bois dans les forêts françaises. En rouge : les cinq simulations qui minimisent l'erreur quadratique moyenne.

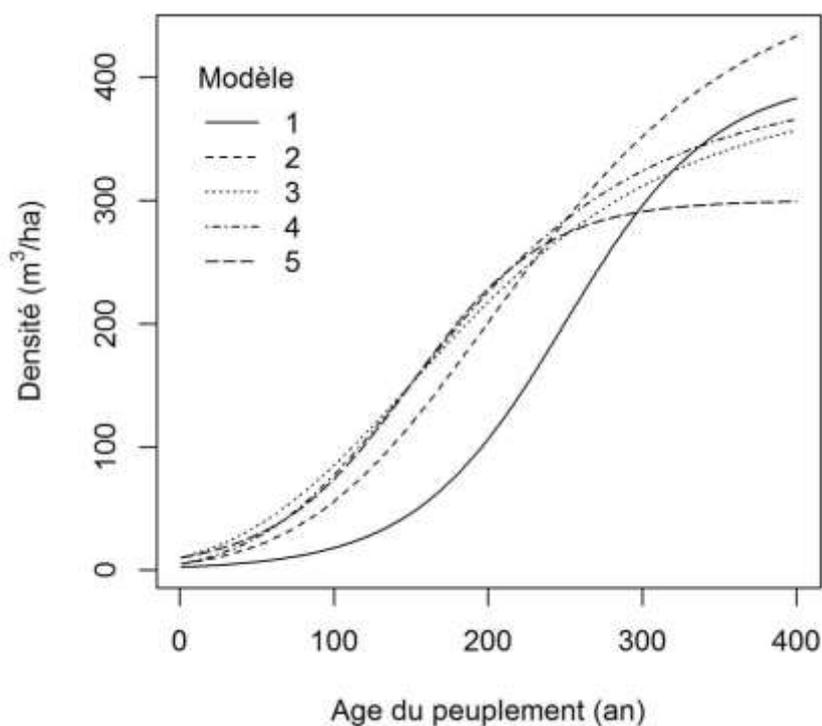


Figure 5.17. Courbes de cinétique d'accumulation de stock net à l'hectare en fonction de l'âge pour les cinq jeux de paramètre minimisant la RMSEP (voir tableau 5.10). Ces simulations sont toutes obtenues avec le modèle de Hossfeld.

4 Interprétation et discussion

4.1 Aspects méthodologiques

Nos estimations de reconstitution du stock ont montré la nécessité de prendre en compte la structure verticale des peuplements pour qu'elles soient réalistes. De plus, les estimations basées sur les moyennes semblent surestimées, signe d'une forte densification du stock sur la période étudiée. A titre d'illustration, des données anciennes sur la forêt de Haguenau permettent de mettre en avant cette densification. En effet, cette forêt indivise a connu une augmentation de sa densité de $+91 \text{ m}^3/\text{ha}$ entre 1842 et 1992 (+62% ; Geldreich, 1994), liée, au moins en partie, à la plantation de hêtre en sous-étage de la chênaie afin d'augmenter les volumes de bois, améliorer la qualité des fûts des chênes et limiter la végétation concurrente dans le sous-bois. Cette densification explique que les estimations les plus réalistes soient obtenues en utilisant les données AM de l'inventaire plutôt que celles de la NM. Une reconstitution basée sur les données AM, une partition prenant en compte la structure des peuplements et une imputation conditionnelle de quantiles de stock (entre 0,10 et 0,50) semble donc plus cohérente.

4.2 Principaux résultats

4.2.1 Intensité d'augmentation séculaire du stock

Sur la base de la meilleure paramétrisation (**Tableau 5.10**), **le stock de bois aurait pu augmenter de +300% entre 1892 et 2010 alors que les surfaces n'ont augmenté seulement que de +60%**, ce qui constitue une augmentation de $+97 \text{ m}^3/\text{ha}$ pour la densité de stock au cours de la période. Cette augmentation, très rapide, est très proche de celle qui a été estimée en Suisse à partir d'un modèle (+292% entre 1860 et 2006 ; Usbeck *et al.*, 2010).

Nos simulations montrent que les forêts françaises présentaient une densité très faible au début du siècle ($25 \text{ m}^3/\text{ha}$ en 1850). Cette densité est d'autant plus faible qu'en 2010, les taillis présentent une densité moyenne de $66 \text{ m}^3/\text{ha}$ et sont donc déjà plus que deux fois plus denses que ces forêts. L'utilisation du modèle de Hossfeld pour la reconstitution de l'évolution du stock montre la **lente capitalisation des forêts au début de la chronologie**.

4.2.2 Puits de carbone des forêts

On remarque que les modèles minimisant la RMSEP sont assez proches au niveau de leurs paramétrisations (**Tableau 5.10**) et présentent des évolutions de stocks proches (**Figure 5.16**), bien qu'ils présentent des trajectoires de densité de stock en fonction de l'âge assez différentes (**Figure 5.17**). Ces modèles présentent cependant toujours une trajectoire convexe sur la période d'étude avec un point d'inflexion constamment au-dessus de 150 ans, ce qui

couvre l'ensemble de la période 1850-2000. Cela suggère que **les forêts françaises se sont densifiées sans saturation depuis plus de 150 ans, constituant un puit de carbone sur cette période**. De plus, l'ensemble des modèles présentent une densité maximale élevée (400 et 500 m³/ha en général), suggérant que **l'accumulation de stock sur pied est loin de la saturation et devrait ainsi continuer de constituer un puit de carbone pour encore plusieurs siècles, toutes choses égales par ailleurs**.

4.2.3 Hypothèses explicatives à l'accélération d'accumulation de stock

Si l'on reprend le bilan précédemment présenté en partie III – 3.2.3, on peut le simplifier et l'écrire comme suit :

$$V_{t+\Delta t} = V_t + C_R - P_t \quad (17)$$

Avec V_f le volume final, V_0 le volume initial, C_R la croissance globale (comprenant croissance et recrutement) et P_t les prélèvements globaux (comprenant prélèvement et mortalité).

Cette équation peut s'écrire également sous la forme suivante :

$$V_t = (1 + q)^t \cdot V_0 \quad (18)$$

Avec :

$$q = \frac{C_R - P_t}{V_0} \quad (19)$$

Entre 1892 et 1908, q peut être estimé et on obtient $q = 0,6\%$. De même, il est possible d'estimer la valeur de q nécessaire à l'augmentation de stock estimée entre 1892 et 2010. Pour s'affranchir de l'effet des plantations sur q , le stock de 2010 a été diminué de 17,5% (estimation d'un minimum de 17,5% du volume actuel provenant des forêts récentes ; **Annexe V.3**). On obtient alors, $q = 1\%$. Cette différence de 0,4% entre les deux estimations montre qu'avec un coefficient constant, une augmentation du stock aussi importante que celle observée n'aurait pas été possible. L'augmentation de q sur la période peut être due à une augmentation de la croissance globale et/ou à une diminution des prélèvements globaux.

Nous avançons donc deux hypothèses pour essayer de rendre compte de l'accumulation très lente et accélérée du stock: l'une liée à l'augmentation de la croissance des forêts, et la seconde liée à la dynamique des prélèvements en forêt.

La première hypothèse peut être liée à l'augmentation de la fertilité des forêts suite à une forte exploitation et aux changements de croissances liés aux changements environnementaux (voir partie I – 2.3.1). Les forêts de 1850, à l'évidence surexploitées (proximité du minimum forestier) ont pu faire l'objet d'une reconstitution progressive de fertilité (Glatzel *et al.*, 1999). La surexploitation des forêts a touché la strate forestière (Marie et Feuvrier, 1990) mais aussi les sous-bois (surpâturage ; Némoz-Rajot, 1998) et les sols (enlèvement des litières ; Henry, 1901 ; Schwappach, 1900), bien que cette dernière pratique n'ait été, à priori, que peu effectuée en France. **Cette surexploitation globale entraînant, à la fois, une baisse de la densité de bois et une perte de la fertilité du sol, peut expliquer cette faible capitalisation initiale de ces forêts, mais surtout leur lente capitalisation.**

On peut tenter d'explorer la seconde hypothèse à partir de données additionnelles de prélèvements. En effet, les statistiques anciennes (statistiques agricoles de 1892 et 1929 et statistique Daubrée) renseignent sur les prélèvements de bois en forêts au début du XX^{ème} siècle. A partir de ces données et des données de prélèvements de l'IFN, il est possible d'étudier l'évolution des prélèvements depuis 1892.

Différentes catégories sont répertoriées dans les statistiques anciennes. Un travail d'homogénéisation des informations apportées et de conversion des productions en mètres cubes a été effectué (**Annexe V.4**). Il a été possible de séparer la production entre bois d'œuvre et d'industrie (BOI) et bois de chauffage. Ces productions correspondent à l'ensemble du bois commercialisé (troncs et branches) et ne peuvent être directement comparées aux données de prélèvement de l'IFN qui correspondent au volume bois fort tige de l'ensemble des arbres prélevés (commercialisés ou non) de plus de 7,5 cm de diamètre à 1,30 m.

Les prélèvements IFN ont été calculés soit à partir du bilan des flux pour les données AM (voir chapitre IV) soit à partir des prélèvements relevés en retournant sur le point 5 ans après pour les données NM (voir partie II - 2.1). Des données plus anciennes ont été mises à notre disposition pendant l'analyse, nous permettant, pour 53 départements, de calculer les prélèvements sur une période encore plus récente (en moyenne en 1980 ; **Figure 5.1**).

Sachant qu'en 1892 et 1908 l'Alsace-Moselle, alors annexée, n'était pas inventoriée, un volume prélevé relatif a été calculé afin de pouvoir comparer ces résultats à ceux de 1929 (**Figure 5.18**).

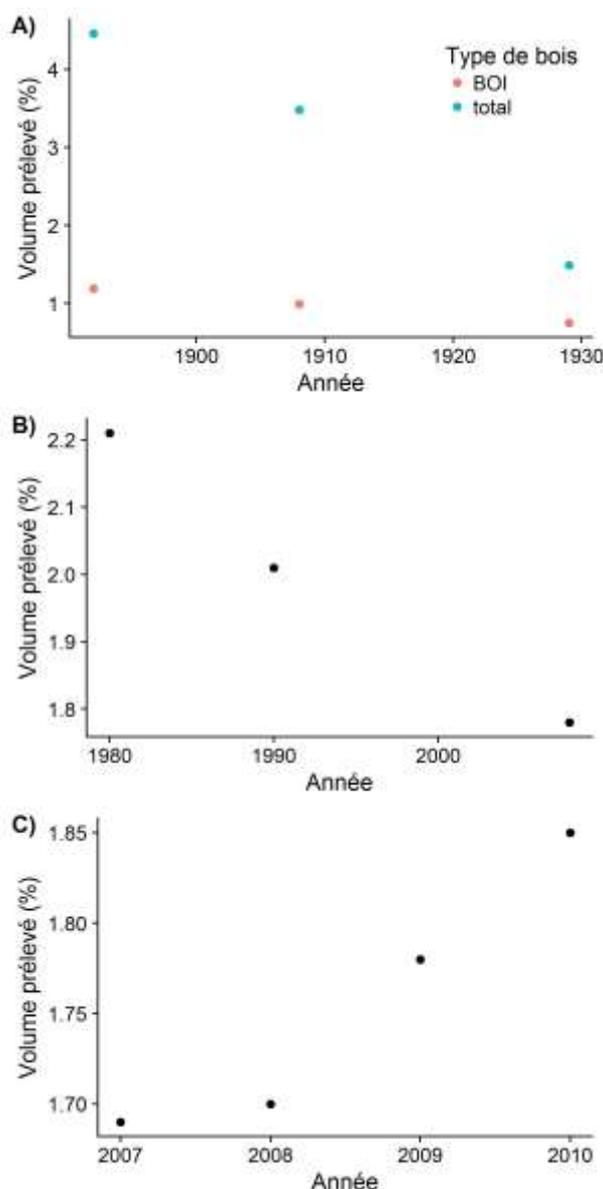


Figure 5.18. Volume relatif prélevé à partir des données des statistiques agricoles de 1892 et 1929 et de la statistique Daubrée (1908 ; A) et des données IFN (B et C). Dans le graph B, la donnée de 2008 est une moyenne des prélèvements entre 2006 et 2010 et celle de 1980 est évalué sur seulement 53 départements. Le graph C présente des moyennes sur 3 ans consécutifs.

Nos résultats montrent **qu'entre 1892 et 1929 et entre 1980 et 2008, le taux de prélèvement en volume a diminué**, ce qui peut avoir contribué à la forte croissance du stock observé dans nos simulations et l'accélération de son expansion au début de la période 1850-2010. **Cependant, l'intensité de ces changements de prélèvement (Figure 5.18) est faible et ne semble pas avoir dépassé 1% par an. Ces changements ne paraissent intuitivement pas à même d'expliquer une variation de stock de plus de 250% sur le siècle, ce qu'une**

simulation plus mécaniste, fondée sur un modèle démographique, pourrait permettre d'explorer.

Les données des statistiques anciennes estiment la production totale, prenant en compte le bois d'œuvre et d'industrie ainsi que le bois de chauffage. On remarque alors la forte part, à cette époque, du bois de chauffage dans la production totale. Cette part diminue fortement entre 1892 et 1929. La diminution des prélèvements de bois de chauffage est en accord avec l'hypothèse d'augmentation de la fertilité des forêts.

4.2.4 Contribution des forêts nouvelles (depuis 1850) à l'expansion du stock de bois

Bien que la concordance entre les stocks simulés par les cinq modèles minimisant la RMSEP représente bien l'évolution du stock reconstituée à partir des combinaisons de quantiles (20%, 30% et 40% ou 30%, 30% et 40% pour 1892, 1908 et 1929 respectivement ; **Figure 5.18**), on remarque que ces modèles ne présentent pas une pente aussi forte que celle observée par l'inventaire forestier depuis 1976.

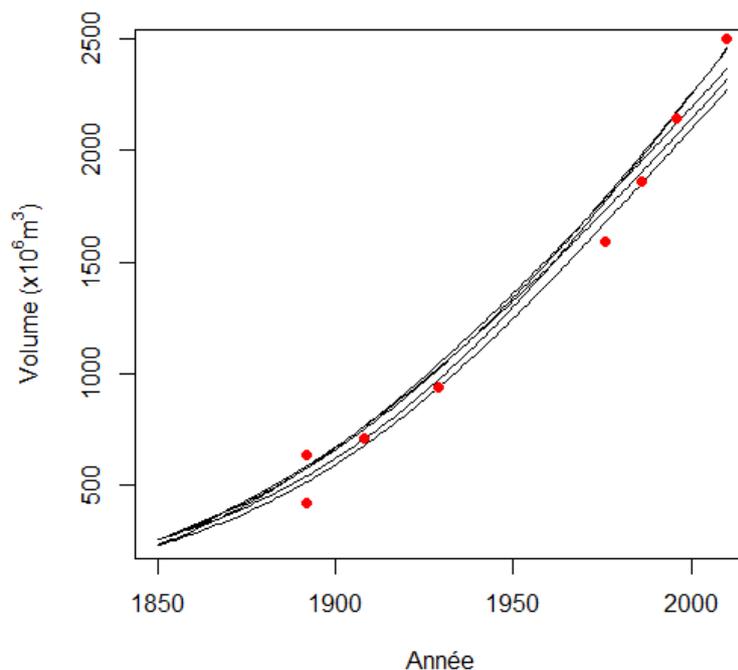


Figure 5.19. Courbes d'évolution du stock issue des cinq simulations de moindre erreur, et les stocks observés (en rouge) par l'inventaire forestier en 1976, 1986, 1996 et 2010 et les stocks reconstitués à partir des quantiles 20 et 30% en 1892, 30% en 1908 et 40% en 1929.

Les parts du stock en 2010 provenant des forêts anciennes (déjà présentes en 1850) ou récentes (arrivées depuis) ont été estimées grâce aux cinq modèles présentant la plus faible RMSEP (**Tableau 5.10**). Les résultats montrent **une faible contribution des forêts récentes**

(entre 2,5 et 11,1% ; Figures 5.20, 5.21, 5.22, 5.23 et 5.24 ; Tableau 5.11), en deçà de ce qu'on peut reconstituer rétrospectivement (estimation d'un minimum de 17,5% du volume actuel provenant des forêts récentes ; Annexe V.3). Cela implique que **la courbe d'évolution de la densité a pu évoluer avec le temps**, en lien, par exemple, avec l'augmentation de la productivité des forêts françaises au cours du XX^{ème} siècle (Charru *et al.*, 2010 et 2014) ou à la plantation et mise en valeur sylvicole d'espèces à croissance rapide (dont les plantations principalement résineuses du FFN ; Rosenbaum et Lindsay, 2001 ; partie I – 1.3.4)

Le modèle pourrait être amélioré en incluant un modèle de densité dépendant du temps ou un modèle de densité différent (de type exponentielle négative) pour les nouvelles forêts provenant de plantations.

Modèle utilisé	Part des forêts récentes dans le volume total	
	(%)	
1	2,5	
2	6,9	
3	11,1	
4	8,7	
5	9,5	

Tableau 5.11. Part des forêts récentes dans le volume forestier total en 2010 d'après les simulations basées sur les 5 modèles présentant la plus faible erreur (voir Tableau 5.10)

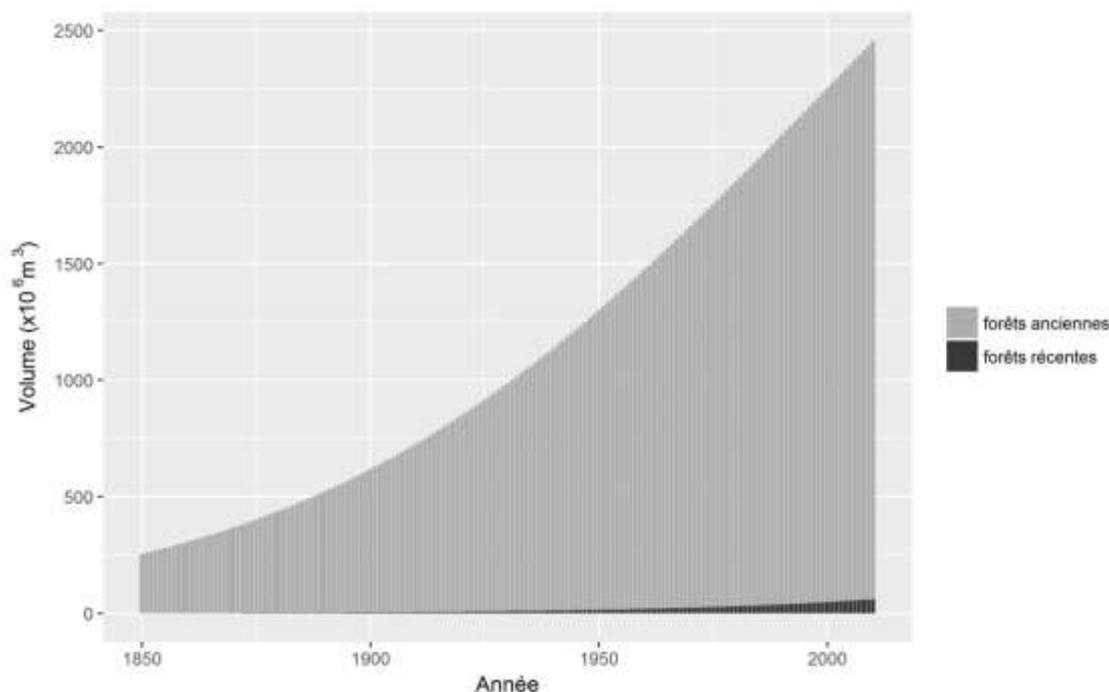


Figure 5.20. Volumes prédits par la simulation à partir du modèle 1 entre 1850 et 2010 selon le type de forêt. Forêts anciennes : forêts déjà présentes en 1850. Forêts récentes : forêts apparues depuis 1850.

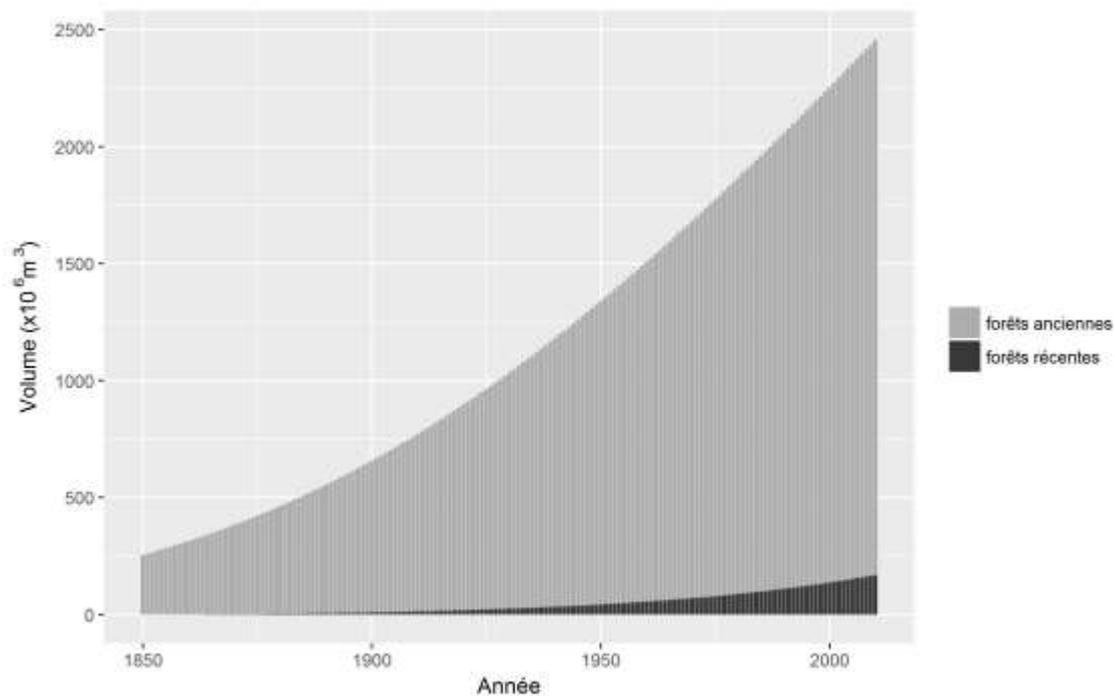


Figure 5.21. Volumes prédits par la simulation à partir du modèle 2 entre 1850 et 2010 selon le type de forêt. Forêts anciennes : forêts déjà présentes en 1850. Forêts récentes : forêts apparues depuis 1850.

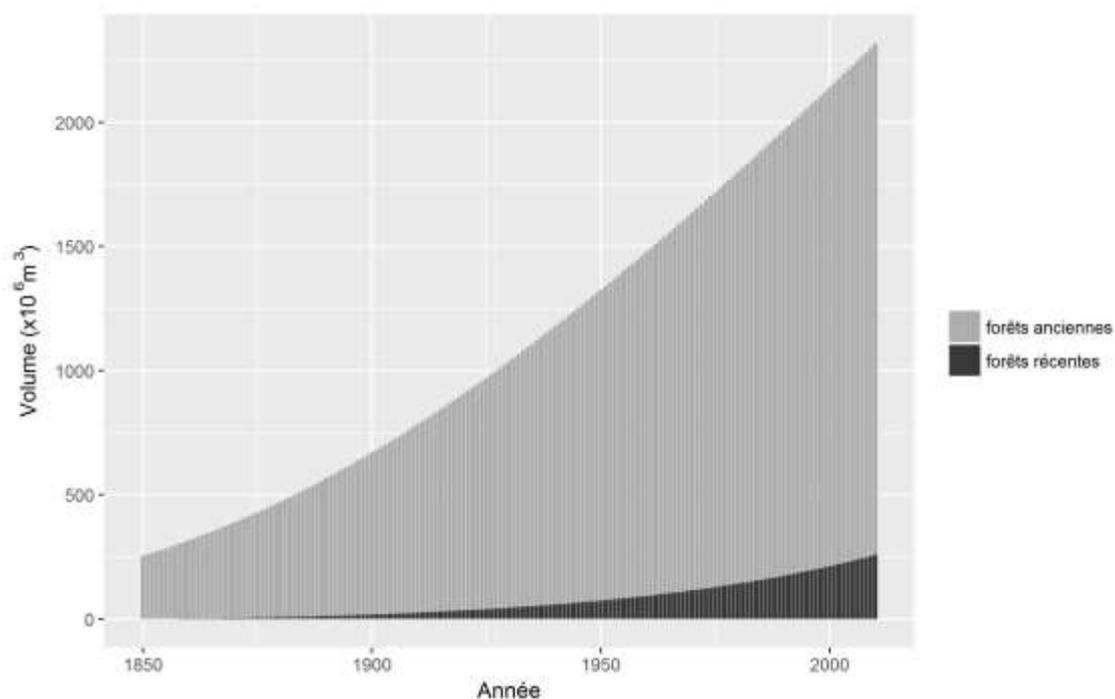


Figure 5.22. Volumes prédits par la simulation à partir du modèle 3 entre 1850 et 2010 selon le type de forêt. Forêts anciennes : forêts déjà présentes en 1850. Forêts récentes : forêts apparues depuis 1850.

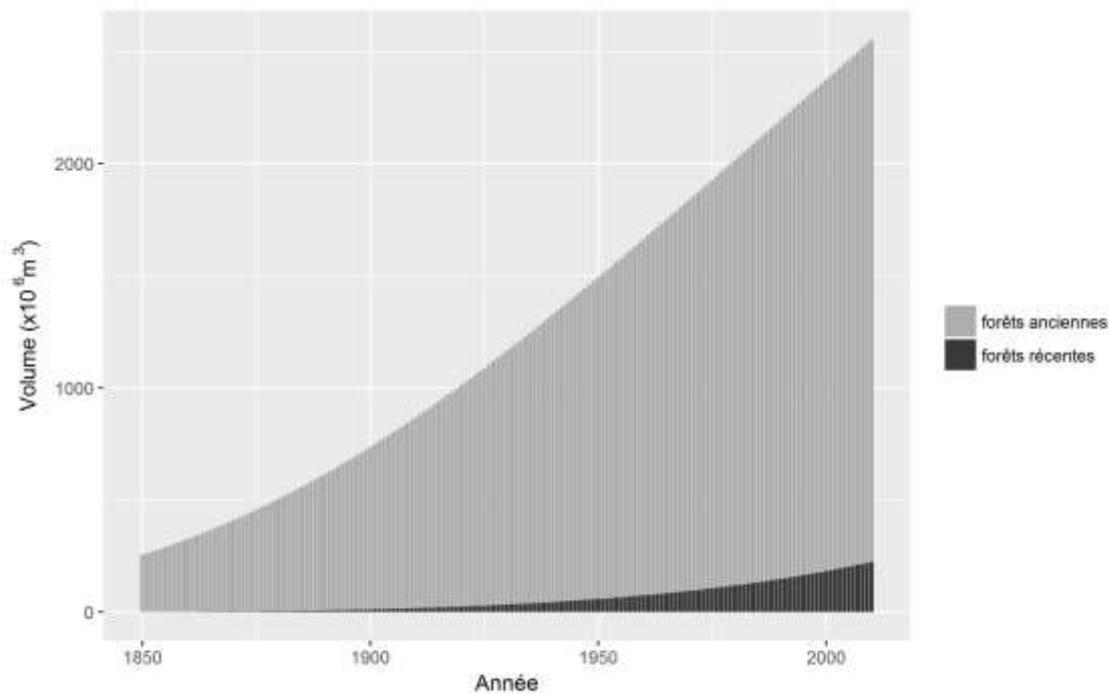


Figure 5.23. Volumes prédits par la simulation à partir du modèle 4 entre 1850 et 2010 selon le type de forêt. Forêts anciennes : forêts déjà présentes en 1850. Forêts récentes : forêts apparues depuis 1850.

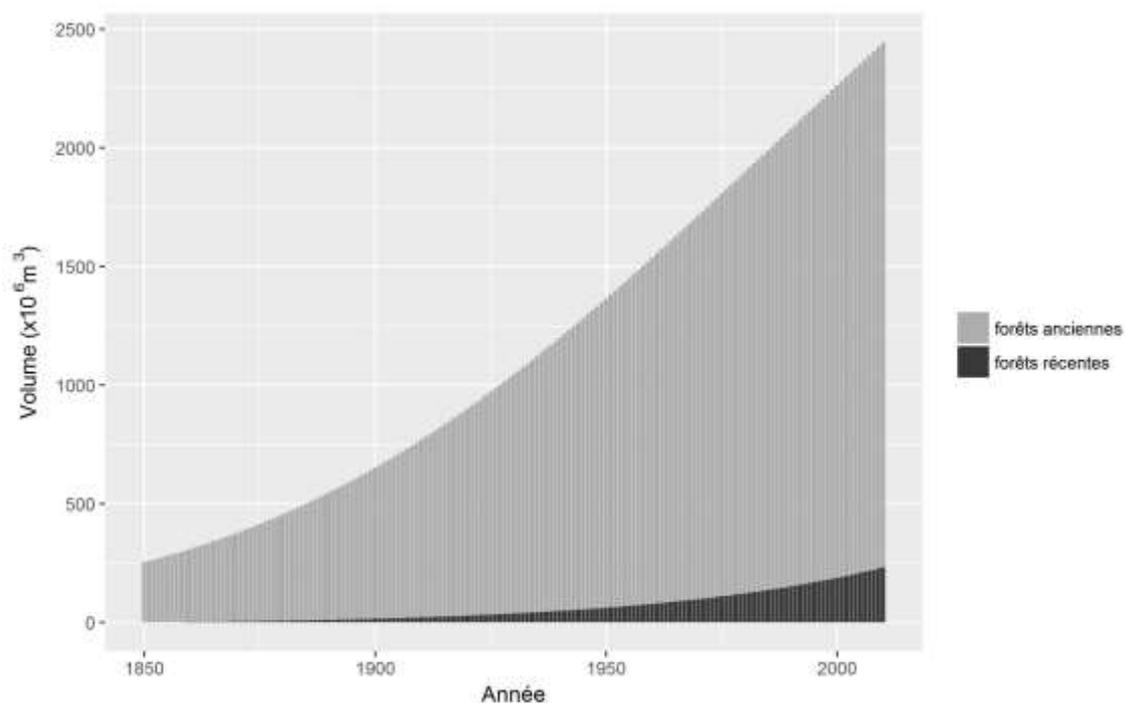


Figure 5.24. Volumes prédits par la simulation à partir du modèle 5 entre 1850 et 2010 selon le type de forêt. Forêts anciennes : forêts déjà présentes en 1850. Forêts récentes : forêts apparues depuis 1850.

Résumé du chapitre V

Avant la mise en place de l'IFN, aucune statistique forestière n'apportait d'information sur le stock sur pied des forêts. L'analyse de l'évolution sur le long terme de ce stock ne peut se faire sans une estimation préalable de ces stocks anciens.

Dans ce chapitre, nous avons utilisé une méthode d'imputation conditionnelle afin d'estimer les stocks anciens à partir des stocks à l'hectare des forêts inventoriées par l'IFN et des surfaces informées par les statistiques anciennes (1892, 1908 et 1929). Deux jeux de données de l'IFN ont été utilisés : le premier inventaire disponible en base et un inventaire moyen NM. Une partition par département, type de propriété et structure forestière a été utilisée. Les estimations ont été effectuées soit à partir de la moyenne des stocks à l'hectare soit des quantiles de 10, 20, 30, 40 et 50%.

Dans un deuxième temps, une simulation de l'évolution du stock sur pied des forêts française depuis 1850 a été effectuée. Cette simulation prend en compte : i) l'évolution des surfaces depuis 1850 estimée à partir d'une régression polynomiale sur les données de surfaces anciennes (augmentées ou non de 1 million d'hectare) et les données de surface de l'IFN entre 1976 et 2010, ii) un modèle de densité des peuplements en fonction de l'âge. Trois modèles ont été testés : concave saturant, linéaire et sigmoïde. Pour chaque simulation, plusieurs hypothèses de densité initiale et de paramètres du modèle ont été testées. Les résultats de la simulation ont été comparés aux estimations de stock et aux données de stock IFN de 1976, 1986, 1996 et 2010 en calculant l'erreur (RMSEP) entre les prédictions et les différentes combinaisons possibles de stock (combinaisons fabriquées à partir des moyennes et des quantiles estimés).

Nos résultats montrent que le modèle sigmoïde est le seul à permettre de reconstituer une évolution du stock qui correspond à celle observée par l'IFN. Les temps aux points d'inflexion des meilleures simulations montrent que depuis 1850, la capitalisation globale des forêts françaises s'effectue selon une trajectoire convexe singulière. Les meilleurs résultats ont été obtenus à partir des quantiles de 30, 30 et 40% pour les années 1892, 1908 et 1929 respectivement, soulignant la forte capitalisation de la forêt française sur la période (+97 m³/ha entre 1892 et 2010). Alors que le stock sur pied a augmenté de 300% entre 1892 et 2010, la surface n'a augmenté que de 60%. La trajectoire convexe observée peut admettre deux explications hypothétiques : l'une fondée sur la diminution des taux de prélèvements au cours du temps, l'autre à une reconstitution progressive de fertilité depuis le minimum forestier. Toutefois, les variations historiques de taux de prélèvements dont nous disposons suggèrent une baisse insuffisante pour expliquer une telle variation de stock

Notre simulation a montré une incapacité partielle à séparer les contributions entre forêts anciennes (déjà présentes en 1850) et forêts récentes (apparues depuis), mettant en exergue la capitalisation différentielle de ces deux types de forêts.

