



HAL
open science

**Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction
"puits de carbone" des peuplements forestiers.
Modélisation et simulation à l'échelle de la parcelle**

Patrick Vallet

► **To cite this version:**

Patrick Vallet. Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction "puits de carbone" des peuplements forestiers. Modélisation et simulation à l'échelle de la parcelle. Life Sciences [q-bio]. ENGREF (AgroParisTech), 2005. English. NNT: . pastel-00001635

HAL Id: pastel-00001635

<https://pastel.hal.science/pastel-00001635>

Submitted on 27 Mar 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

présentée devant
L'École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts

pour l'obtention

du **DIPLÔME DE DOCTORAT**

mention **SCIENCES FORESTIÈRES**

par **Patrick VALLET**

le 26 octobre 2005

**IMPACT DE DIFFÉRENTES STRATÉGIES SYLVICOLES
SUR LA FONCTION « PUICTS DE CARBONE » DES PEUPELEMENTS FORESTIERS
MODÉLISATION ET SIMULATION À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE**

COMPOSITION DU JURY :

Gero BECKER	Professeur – Université de Fribourg	Rapporteur
Bernard SAUGIER	Professeur émérite – Université Paris XI	Rapporteur
Jean-Luc PEYRON	Directeur du GIP ECOFOR	Président du jury
Caroline RANTIEN	Ingénieur – ADEME	
Etienne DAMBRINE	Directeur de Recherches – INRA	
Laurent SAINT-ANDRÉ	Chercheur – CIRAD	
Jean-François DHÔTE	Directeur de Recherches – INRA	Directeur

Cette thèse a été effectuée au sein du Laboratoire d'Études des Ressources Forêt-Bois (LERFoB), UMR INRA-ENGREF 1092.

Elle a été cofinancée par l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie et le Conseil Régional de Lorraine.



TABLE DES MATIERES

Introduction **1**

1 – Contexte général.....	1
2 – Objectifs de la thèse	3
3 – Hypothèses de travail	4
3 – 1. Echelles spatiales	4
3 – 2. Echelles temporelles	4
3 – 3. Compartiments concernés.....	4
3 – 4. Outils utilisés	5
3 – 5. Sylvicultures envisagées.....	5
3 – 6. Produits forestiers	5
3 – 7. Limitations.....	5

PARTIE A : CONSTRUCTION D'UNE CHAINE DE MODELES

Chapitre I – Peuplement **8**

I.1 – Description des trois modèles de croissance	8
I.1 – 1. Fagacées.....	8
I.1 – 1.1. La croissance	8
I.1 – 1.2. Les éclaircies	9
I.1 – 2. Pnl	10
I.1 – 3. Simcop	10
I.2 – Comptabilité du carbone du peuplement.....	11
I.2 – 1. Carbone aérien ligneux	11
I.2 – 1.1. Volumes aériens	11
I.2 – 1.2. Densités et Infradensités.....	13
I.2 – 1.3. Cas particulier du Douglas	15
I.2 – 1.4. Taux de carbone	15
I.2 – 2. Systèmes racinaires	16
I.2 – 3. Carbone foliaire.....	19
I.3 – Discussion	19

Chapitre II – Le carbone du sol **21**

II.1 – Analyse bibliographique	21
II.1 – 1. Les modèles de la littérature	21
II.1 – 2. Le modèle Century	22
II.2 – Analyse de sensibilité de <i>Century</i>	23
II.2 – 1. Méthode et critères utilisés	23

II.2 – 2. Effet des constantes de décomposition	25
II.2 – 3. Effet de la température.....	26
II.2 – 3.1. Sensibilité de la température moyenne.....	27
II.2 – 3.2. Sensibilité des variations de température	28
II.2 – 4. Effet de la pluviométrie	30
II.2 – 5. Effet de climats réalistes	33
II.2 – 6. Rapport « Lignine / Azote ».....	34
II.2 – 7. Apports de matière.....	35
II.2 – 7.1. Aspects quantitatifs	35
II.2 – 7.2. Répartition intra-annuelle.....	35
II.2 – 8. Effet de la texture du sol.....	38
II.3 – Description des données.....	38
II.3 – 1. Réseau européen	39
II.3 – 2. Réseau RENECOFOR	40
II.3 – 3. Données climatiques	43
II.3 – 4. Rapport « Lignine / Azote ».....	43
II.4 – Modélisation.....	44
II.4 – 1. Modèle de chutes de litière	44
II.4 – 1.1. Approche locale	44
II.4 – 1.2. Approche globale	46
II.4 – 1.3. Proportion de feuilles et de branches	48
II.4 – 1.4. Cas des autres essences	49
II.4 – 1.5. Pourcentage de carbone dans la matière sèche.....	50
II.4 – 2. Modèle statique du carbone du sol.....	51
II.4 – 2.1. Définition de l’objet étudié	51
II.4 – 2.2. Construction du modèle	53
Groupement par type de sol	54
Groupement par essence	55
Autres variables significatives	59
II.4 – 2.3. Résultats numériques	59
II.4 – 2.4. Variables non significatives	60
II.5 – Comparaison simulations / observations.....	62
Effet de la température	62
Effet des précipitations.....	62
Effet du peuplement de couverture	63
Effet de la texture du sol	64
II.6 – Valeurs des apports de carbone par essence	65
II.6 – 1. Méthode	65
II.6 – 2. Conditions moyennes par essence	65
II.6 – 3. Résultats.....	68
II.7 – Conclusion du chapitre	68
III – Produits forestiers	70
III.1 – Les filières bois.....	71
III.1 – 1. Principes généraux	71
III.1 – 2. La filière papier carton	71
III.1 – 3. La filière bois énergie.....	73

III.1 – 4. La filière construction.....	73
III.1 – 5. La filière ameublement.....	75
III.1 – 6. La filière emballage.....	76
III.1 – 7. Bilan de durée de vie par filière.....	77
III.1 – 8. Lois de durée de vie.....	77
III.2 – La répartition en produits pour les feuillus.....	80
III.2 – 1. Cas du Chêne sessile.....	80
III.2 – 1.1. Profil de tige.....	80
III.2 – 1.2. Répartition dans les filières de produits forestiers.....	80
III.2 – 2. Cas du Hêtre.....	82
III.2 – 2.1. Profil de tige.....	82
III.2 – 2.1.1 Données disponibles.....	82
III.2 – 2.1.2 Modèle de hauteur de base de houppier.....	83
III.2 – 2.2. Répartition dans les filières de produits forestiers.....	90
III.3 – La répartition en produits pour les résineux.....	91
III.3 – 1. Cas du Pin laricio.....	91
III.3 – 2. Cas du Douglas.....	92
III.3 – 3. Utilisation des sorties de WinEpiFn.....	93
III.3 – 3.1. Calcul des biomasses.....	93
III.3 – 3.2. Répartition dans les cinq filières.....	93
III.4 – Discussion.....	96
III.4 – 1. Le recyclage.....	96
III.4 – 2. La non spécificité des produits.....	96
III.4 – 3. Utilisation de durées de vie.....	97
III.4 – 4. Répartition des produits.....	97

PARTIE B : EXPLOITATION D'UNE CHAÎNE DE MODELES

Chapitre I – Capitalisation sur pied 100

I.1 – Démarche et comparaisons.....	101
I.1 – 1. Sylvicultures pratiquées.....	101
I.1 – 2. Carbone du système foliaire.....	102
I.1 – 3. Carbone du système racinaire.....	102
I.1 – 3.1. Influence de la densité sur le stock racinaire.....	102
I.1 – 3.2. Influence de la sylviculture sur les apports racinaires au sol.....	103
I.1 – 4. Carbone du sol.....	104
I.1 – 5. Carbone des parties aériennes ligneuses.....	104
I.1 – 6. Carbone des produits forestiers.....	106
I.1 – 7. Bilan pour les deux scénarios considérés.....	107
I.2 – Etude du régime permanent.....	110
I.2 – 1. Cas du Chêne sessile.....	110
I.2 – 1.1. Influence de la densité et de la fertilité des peuplements.....	110
I.2 – 1.1.1 Bilans de carbone en fonction de la densité pour trois fertilités.....	110
I.2 – 1.1.2 Répartition des stocks pour une situation type.....	113

I.2 – 1.2. Influence du diamètre d’exploitabilité.....	115
I.2 – 2. Cas du Hêtre.....	116
I.2 – 2.1. Influence de la densité et de la fertilité des peuplements.....	117
I.2 – 2.1.1 Bilans de carbone en fonction de la densité pour trois fertilités.....	117
I.2 – 2.1.2 Répartition des stocks pour une situation type.....	119
I.2 – 2.2. Influence du diamètre d’exploitabilité.....	120
I.3 – Etude du régime transitoire	123
I.3 – 1. Scénario simulé.....	123
I.3 – 2. Evolution des stocks de carbone	124
I.4 – Discussion	127
I.4 – 1. Bilan.....	127
I.4 – 2. Comparaison Chêne sessile – Hêtre.....	128
I.4 – 3. Place des produits forestiers.....	129

Chapitre II – Substitution d’essences **130**

II.1 – Fertilité différentielle	131
II.1 – 1. Couple Chêne sessile / Pin laricio.....	131
II.1 – 2. Couple Hêtre / Douglas.....	134
II.1 – 2.1. Données disponibles.....	134
II.1 – 2.2. Croissance en hauteur dominante.....	134
II.1 – 2.3. Conséquences sur la fertilité différentielle.....	138
II.2 – Description des simulations	140
II.2 – 1. Evolution des peuplements	140
II.2 – 1.1. Pin laricio	140
II.2 – 1.2. Chêne sessile	141
II.2 – 1.3. Douglas	142
II.2 – 1.4. Hêtre.....	143
II.2 – 2. Carbone du sol	144
II.2 – 2.1. Quantités d’apports de carbone au sol.....	144
II.2 – 2.2. Conditions climatiques.....	144
II.2 – 2.3. Autres conditions	146
II.3 – Bilans de carbone par essence	146
II.3 – 1. Pin laricio.....	146
II.3 – 2. Chêne sessile.....	149
II.3 – 3. Douglas.....	150
II.3 – 4. Hêtre	152
II.4 – Impact de la substitution.....	154
II.4 – 1. Evolution du carbone du sol	154
II.4 – 1.1. Couple Chêne sessile / Pin laricio	154
II.4 – 1.2. Couple Hêtre / Douglas.....	154
II.4 – 2. Etude du régime permanent	155
II.4 – 3. Conclusion	157
II.4 – 4. Etude du régime transitoire.....	160

Discussion générale **165**

1 – Les modèles utilisés.....	165
1 – 1. Evolution des peuplements	165
1 – 1.1. Les modèles de croissance	165
1 – 1.2. Le sous-étage.....	165
1 – 1.3. Les tarifs de cubage.....	166
1 – 1.4. L'infradensité	166
1 – 1.5. Le taux de carbone	166
1 – 2. Les biomasses racinaires.....	168
1 – 3. Carbone du sol	169
1 – 4. Produits forestiers	171
2 – Bilan des résultats.....	173
2 – 1. La capitalisation sur pied	173
2 – 2. La substitution d'essence	174
3 – Perspectives	175
3 – 1. Améliorations	175
3 – 2. Approfondissements	175

Références bibliographiques **177**

ANNEXE I – Développement informatique **191**

ANNEXE II – la loi de Weibull **194**

Introduction

1 – Contexte général

De nombreuses études présentent déjà la problématique des gaz à effet de serre, ainsi que les bilans de carbone à l'échelle globale (Cannell 1995, Kohlmaier *et al.* 1998, IPCC 2000, Robert et Saugier 2003, Prieur 2004), et nous nous contenterons d'une présentation sommaire.

La figure 1, extraite d'une revue de Cannell (1995) reproduit le cycle du carbone à l'échelle planétaire, et illustre l'existence de trois grands compartiments du carbone : l'atmosphère (750 GtC), la biomasse et les sols (2050 GtC), et les océans (~ 40 000 GtC). Les hydrocarbures fossiles constituent un compartiment supplémentaire dont la taille n'est pas réellement connue, et qui, avant la révolution industrielle, était disjoint des trois réservoirs précédents.

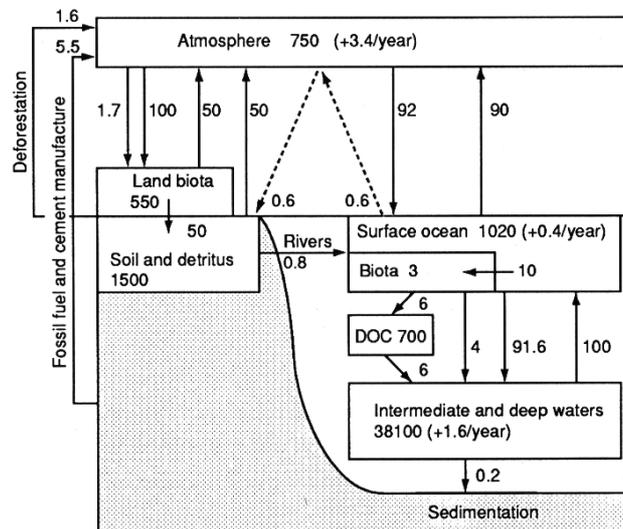


Figure 1 : Flux (en GtC/an) et réservoirs (en GtC) de carbone entre 1980 et 1989 à l'échelle de la planète. Source : Cannell 1995

La combustion des hydrocarbures fossiles ainsi que les cimenteries alimentent l'ensemble des trois grands compartiments dans lesquels se répartit le carbone émis. Si les océans absorbent une partie de ces émissions, la déforestation déstocke du carbone. Ainsi, le réservoir atmosphérique subit une augmentation de 3,4 GtC/an.

Il s'ensuit une très rapide augmentation de la concentration de CO₂ dans ce compartiment. De son niveau de 270 ppm à l'ère préindustrielle (Cannell 1995), le taux de CO₂ atmosphérique a augmenté de façon accélérée pour atteindre un niveau de 377 ppm en moyenne sur l'année 2004 (Keeling et Whorf 2005). Des scénarios d'évolution future en fonction des politiques possibles qui seront menées ont été établis par l'IPCC (2001). Ils sont présentés figure 2. Les plus grandes incertitudes ne sont pas sur les aspects scientifiques des évolutions, mais sur les décisions politiques qui seront prises. Les scénarios les plus optimistes impliquent un taux de gaz carbonique au-delà de 500 ppm en 2100.

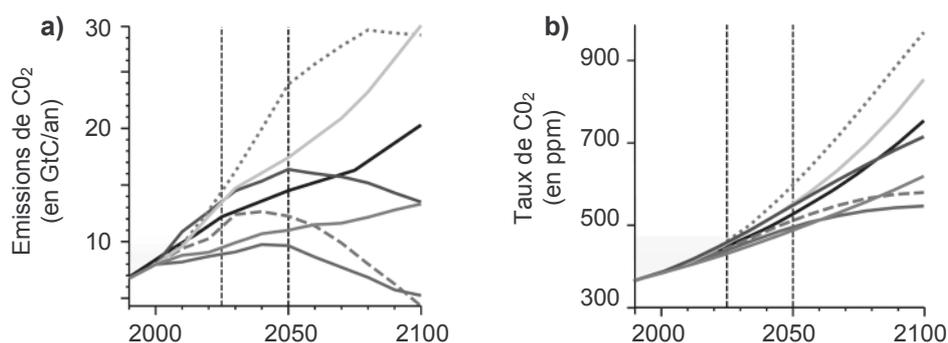


Figure 2 : Scénarios d'évolution a) des émissions globales de CO₂ (en GtC/an) b) des évolutions résultantes des taux de CO₂ atmosphériques (en ppm de CO₂) (IPCC 2001)

Les conséquences de ce forçage radiatif sont exposées tous les jours dans les médias, et nous ne les développerons pas ici. Notons seulement un point de repère : l'augmentation moyenne des températures à la surface du globe serait d'un peu plus de 1°C en 2100 avec l'hypothèse la plus optimiste et de près de 6°C avec la plus pessimiste (IPCC 2001). À titre de comparaison, la température moyenne lors de la dernière glaciation était inférieure seulement de 4 à 5°C par rapport à la température actuelle (Cannell 1995), ce qui permet de situer l'importance du problème, et la nécessité d'un stockage actif du carbone.

Les écosystèmes forestiers, grâce à la photosynthèse qui permet de fixer le CO₂ atmosphérique, peuvent participer au stockage de ce carbone de plusieurs manières (Lindner 1998) : i) par l'augmentation des surfaces forestières, ii) par l'accroissement des stocks de carbone dans les forêts existantes, iii) par la substitution des combustibles fossiles par l'énergie biomasse.

Cannell (2003) a fait une estimation des potentialités de stockage de carbone à l'échelle de la planète : la biomasse pourrait de manière réaliste absorber 50 à 100 GtC pendant 50 ans, soit 1 à 2 GtC/an pendant cette période.

Actuellement, les pays ayant ratifié le protocole de Kyoto doivent stabiliser leurs émissions de gaz à effet de serre au niveau de celles de l'année 1990. La France, bien placée sur ce plan par rapport aux autres pays européens en raison de l'important parc nucléaire pour la production d'énergie, doit pour la première période d'engagement (2008 – 2012) ramener ses émissions au niveau de celles de 1990. Pour cette période d'engagement, le rôle des forêts est limité par l'article 3.3 du Protocole aux seules afforestations, reforestations et déforestations. La gestion sylvicole rentre dans le cadre de l'article 3.4 définissant les changements de pratiques, mais n'est pas comptabilisée dans les puits de carbone (UNFCCC 1997). Cependant, Galinski (2005) estime à 90% les chances que la gestion sylvicole soit incluse pour la seconde période d'engagement.

2 – Objectifs de la thèse

Dans la perspective où la gestion sylvicole donnerait lieu à des crédits d'émission à partir de la seconde période d'engagement, le Protocole de Kyoto stipule « la nécessité de communiquer des données transparentes et vérifiables » (UNFCCC 1997). En conséquence, il serait nécessaire i) d'améliorer les procédures de comptabilité du carbone (Vallet *et al.* 2005), ii) de mieux connaître, à la fois dans leurs principes mais aussi de manière concrète et quantifiée les effets des choix de gestion sur les stocks de carbone forestiers et leurs variations, iii) de décliner ces résultats dans un contexte où les facteurs de production (climat, CO₂, qualités des sols, apports atmosphériques d'azote) et le contexte socio-économique vont évoluer rapidement, iv) d'évaluer sous l'angle de variations de stocks de carbone les différentes stratégies sylvicoles, à la fois à l'échelle du décideur de terrain et à l'échelle politique (impacts conjoints sur la biodiversité, les autres aspects environnementaux, les ressources en bois, la vulnérabilité des forêts).

Les connaissances doivent alors être résumées dans des modèles conçus pour la simulation, et non pour l'aspect cognitif, et permettant de répondre à des impératifs de précision et de sensibilité aux pratiques sylvicoles.

L'objectif de la thèse est alors de s'appuyer sur les acquis pour modéliser quantitativement la réponse des stocks de carbone forestiers à des scénarios de gestion, en intégrant l'ensemble des compartiments et leurs dynamiques associées d'évolution du carbone. La plate-forme logicielle CAPSIS (de Coligny *et al.* 2003) est un atout considérable pour construire une chaîne de modèles permettant d'explorer des scénarios types et d'identifier les lacunes et les besoins de progrès, ainsi que de proposer des premières indications sur les conséquences des choix de gestion.

Deux stratégies sylvicoles sont abordées dans ce travail :

- Les forêts françaises présentent des volumes à l'hectare assez faibles (Pignard 2000) qui pourraient, en ralentissant les taux de coupe, générer un stockage de carbone additionnel. Cette pratique est appelée « capitalisation sur pied ». L'impact de cette stratégie sylvicole est étudié pour les deux plus grands feuillus en France, le Chêne sessile et le Hêtre.
- Lorsqu'un peuplement forestier arrive en fin de révolution, la question de l'essence utilisée pour la révolution suivante se pose. En effet, les essences à croissance rapide ont des accroissements annuels en volume par définition très élevés, et l'on peut s'attendre alors à ce qu'elles soient plus favorables en terme de stockage de carbone que les essences à croissance lente. Cette seconde stratégie sylvicole étudiée est appelée « substitution d'essence ». On s'intéresse dans ce travail à la substitution des peuplements de Chêne sessile par des plantations de Pin laricio dans les régions Centre et Pays de la Loire, ainsi que celle des peuplements de Hêtre par des plantations de Douglas dans le Massif Central.

3 – Hypothèses de travail

L'étude des deux stratégies sylvicoles exposées pourrait être menée selon différents points de vue. Ce paragraphe présente les choix et les hypothèses de travail qui seront utilisés tout au long du manuscrit.

3 – 1. Echelles spatiales

L'approche choisie est locale : l'étude porte sur des peuplements d'un hectare pour lesquels de nombreux itinéraires sylvicoles seront envisagés et comparés. Cela correspond au niveau de décision de l'aménagiste forestier qui détermine la gestion sylvicole (âges d'exploitabilité, taux de coupes, choix des essences).

Ce type d'étude pourra permettre par la suite d'agréger les résultats à des échelles plus vastes, comme celle du massif forestier dont l'état initial serait connu, pour estimer l'impact de ces stratégies sur les stocks de carbone et sur les implications vis-à-vis des objectifs de réduction des gaz à effet de serre.

3 – 2. Echelles temporelles

Nous ne nous intéressons pas aux flux instantanés de carbone dans le peuplement, mais plutôt aux variations de stocks engendrées par des modifications de pratiques sylvicoles. Celles-ci ne sont détectables qu'à des échelles de temps suffisamment longues. L'échelle de temps pertinente pour estimer les variations de stocks de carbone est l'année, voire la décennie.

En particulier, lorsque nous employons les termes de « bilan de carbone », il ne s'agit pas des flux instantanés, mais bien des variations annuelles des stocks.

Pour chacune des deux stratégies, nous ferons la différence entre le régime permanent et le régime transitoire : le premier correspond à l'état du peuplement forestier obtenu après avoir appliqué un grand nombre de fois les mêmes choix sylvicoles. Dans ce cas, la grandeur la plus intéressante à estimer est le stock moyen de carbone sur l'ensemble de la révolution forestière. L'étude du régime transitoire permet de montrer les cinétiques d'évolution du carbone suivant une modification de la sylviculture. L'absorption annuelle de carbone – toujours en termes de variations de stocks – sera alors l'information intéressante dans ce cas.

3 – 3. Compartiments concernés

La sylviculture influe fortement sur la croissance des peuplements forestiers, mais par voie de conséquence également sur l'approvisionnement des filières bois en quantité et en qualité. Il est donc important de comptabiliser également le stockage dans les produits forestiers.

D'autre part, les stocks de carbone dans la matière organique du sol sont estimés à près de d'une fois et demi ceux de la biomasse (Dupouey *et al.* 1999). Il est alors primordial de prendre également en compte les implications des changements de pratiques sylvicoles sur l'évolution de la quantité de carbone stockée dans les sols.

En revanche, nous nous intéressons dans ce travail uniquement à l'évolution des stocks de carbone. L'impact des stratégies sylvicoles sur les gains ou pertes d'émissions de CO₂ engendrés par la substitution des énergies fossiles par la biomasse n'est pas considéré. Il ne s'agit pas d'un élément au niveau de l'aménagiste, mais au niveau politique.

3 – 4. Outils utilisés

La démarche employée pour répondre à ces questions est la modélisation et la simulation. Nous construisons une chaîne de modèles permettant de prendre en compte les compartiments décrits dans le paragraphe ci-dessus, qui sera exploitée ensuite.

Ces modèles sont soit issus de la littérature, soit précédemment développés au laboratoire, soit élaborés au cours de l'étude.

En particulier, les modèles de croissance sont utilisés compte tenu de l'état de l'art : on ne simule pas l'évolution à venir de la productivité en lien avec les changements climatiques, mais la croissance des peuplements telle qu'elle a été observée et modélisée.

3 – 5. Sylvicultures envisagées

Pour l'étude de la capitalisation sur pied du Chêne sessile et du Hêtre, une large gamme d'itinéraires sylvicoles est envisagée, aussi bien en terme d'intensité de sylviculture, que de diamètre d'exploitabilité. Les simulations sont menées également pour des fertilités contrastées (faible, bonne et très bonne).

En revanche, pour la substitution d'essences, on ne considérera que les sylvicultures actuellement préconisées pour chacune des essences, afin de limiter le nombre de comparaisons.

3 – 6. Produits forestiers

Comme il a été précisé plus haut, le stock moyen de carbone dans les produits forestiers est également pris en compte dans les simulations.

En revanche, les évolutions du marché du bois que pourraient induire un changement de pratiques sylvicoles, et donc un changement d'approvisionnement, ne sont pas prises en compte. Le marché est considéré absorber l'ensemble de la production de la forêt.

3 – 7. Limitations

La présente étude se borne à estimer les implications sur les stocks de carbone induites par des changements de pratiques sylvicoles, sans estimer les effets collatéraux que sont les modifications de la biodiversité et des impacts socio-économiques qui doivent être appréhendés à un autre niveau (décision politique).

Ce rapport est organisé en deux parties. La première dans laquelle la construction des chaînes de modèles pour les quatre essences considérées est exposée, et la seconde où celles-ci sont exploitées.

PARTIE A

Construction d'une chaîne de modèles

Chapitre I – Peuplement

L'entrée de la chaîne de modèles est le peuplement forestier. C'est à ce niveau que les éclaircies sont simulées, et donc que les différences entre les scénarios sylvicoles sont générées.

Pour estimer l'impact de la capitalisation sur pied aussi bien que celui d'une substitution d'essences, les trois modèles de croissance suivants ont été employés :

- « *Fagacées* » pour le Chêne sessile et le Hêtre
- « *Pnl* » pour le Pin laricio
- « *Simcop* » pour le Douglas

La comptabilité du carbone dans tous les compartiments du peuplement forestier est alors effectuée soit au sein du modèle, soit suite à un post-traitement.

Ce chapitre décrit d'abord sommairement les trois simulateurs de croissance utilisés ainsi que les méthodes pour pratiquer les éclaircies. Il définit ensuite les modèles permettant de faire le bilan de carbone du peuplement forestier pour ce qui concerne les arbres sur pied, à savoir les parties aériennes et les systèmes racinaires. Les résultats obtenus à l'aide de ces modèles sont donnés dans la partie B.

I.1 – Description des trois modèles de croissance

Les modèles de croissance de peuplements forestiers sont à la base des simulations effectuées pour estimer l'impact de la sylviculture sur les stocks de carbone. Il est alors nécessaire d'en donner une description, qui reste néanmoins sommaire puisque leur développement n'est pas l'objet de la thèse.

Le modèle *Fagacées* a fait au cours de la thèse l'objet d'une migration dans l'environnement CAPSIS, plateforme informatique programmée en java (de Coligny *et al.* 2003). L'annexe I indique l'architecture du développement informatique.

La maîtrise du code source de *Fagacées* a permis une souplesse d'utilisation et de modification autorisant l'exploration d'un grand nombre de pistes de recherche. En revanche, les modèles *Pnl* et *Simcop* ont été considérés en tant qu'utilisateur, et non programmeur au cours de la thèse. Le premier sera alors plus détaillé.

I.1 – 1. Fagacées

I.1 – 1.1. La croissance

Le modèle *Fagacées* (Dhôte 1991, Dhôte et de Hercé 1994, Dhôte 1996, Dhôte et Le Moguédec 2002) permet de faire évoluer soit des peuplements de Chêne sessile, soit des peuplements de Hêtre. Le fonctionnement est le même pour les deux essences, mais les modèles et paramètres de croissance sont bien évidemment différents.

Fagacées est un modèle de type « arbre indépendant des distances », ce qui signifie que le peuplement n'est pas spatialisé. La figure A1 décrit le fonctionnement d'un pas d'évolution.

- Le pas de temps du modèle est de trois ans, le temps est donc d'abord incrémenté de cette durée.
- L'utilisation d'un modèle de croissance en hauteur dominante permet de calculer l'incrément ΔH_0 survenu pendant ces trois ans. Dans le cas du Chêne, la croissance en hauteur dominante est donnée par le modèle de Duplat (1997) ; pour le Hêtre, un modèle de type Lunqvist-Matern, dérivé du modèle de Korf (Zeide 1993), a été recalibré, en tenant compte des changements de productivité observés (Bontemps *et al.* 2005b).
- Ensuite, l'accroissement de hauteur dominante implique un accroissement en surface terrière du peuplement (ΔG), lequel est réparti entre tous les arbres de manière à assurer la cohérence

$$\Delta G = \sum_i \delta g_i$$

où δg_i est l'accroissement en surface terrière de l'individu i . Les accroissements individuels sont nuls pour les plus petits arbres, et varient linéairement avec leur taille à partir d'un certain seuil (Dhôte 1991). La compétition est donc appréhendée globalement au niveau de la distribution des diamètres.

- Ces accroissements individuels permettent ensuite de calculer les diamètres individuels, moyens et dominants.
- Ensuite, les nouveaux diamètres et hauteurs dominants sont utilisés pour ajuster une courbe hyperbolique donnant la relation entre le diamètre d'un individu et sa hauteur (Dhôte et de Hercé 1994).
- Enfin, le peuplement subit éventuellement une mortalité naturelle si la densité est trop forte.

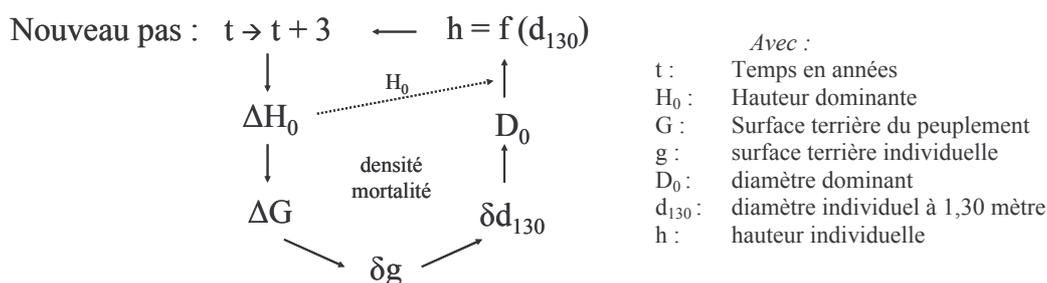


Figure A1 : Fonctionnement schématique d'un pas d'évolution du modèle Fagacées

Le fonctionnement est hybride entre un modèle de type « peuplement » et un modèle de type « arbre », puisque tous les arbres sont individualisés, mais que ce sont les variables « peuplement » qui régissent la croissance.

1.1 – 1.2. Les éclaircies

L'indice de densité du peuplement dans *Fagacées* est le RDI (Relative Density Index), basé sur une idée de Reineke (1933). Il correspond au rapport du nombre de tiges du peuplement par rapport au nombre de tiges maximal autorisé par la loi d'auto-éclaircie. Cet indice varie entre 0 et 1 quel que soit l'âge du peuplement.

Les éclaircies peuvent être déclenchées à n'importe quel pas de la simulation. Deux modalités sont proposées à l'utilisateur : une éclaircie « standard » ou une éclaircie « par le haut ».

L'éclaircie standard correspond à une éclaircie plutôt par le bas, avec une probabilité de coupe décroissant linéairement quand le diamètre augmente, jusqu'à un diamètre plafond défini en fonction de l'intensité de la coupe et de l'histogramme des diamètres, et à partir duquel les arbres ne sont plus martelés. L'éclaircie par le haut fixe une probabilité égale dans toutes les classes de diamètres. Des possibilités intermédiaires sont prévues et seront programmées ultérieurement.

Par ailleurs, il est également possible de générer automatiquement les éclaircies au cours de l'évolution du peuplement. L'utilisateur fixe un RDI objectif à l'âge initial et un autre à l'âge final. Les éclaircies sont alors déclenchées dès que la densité s'écarte trop de la densité objectif (exemple en figure A2).

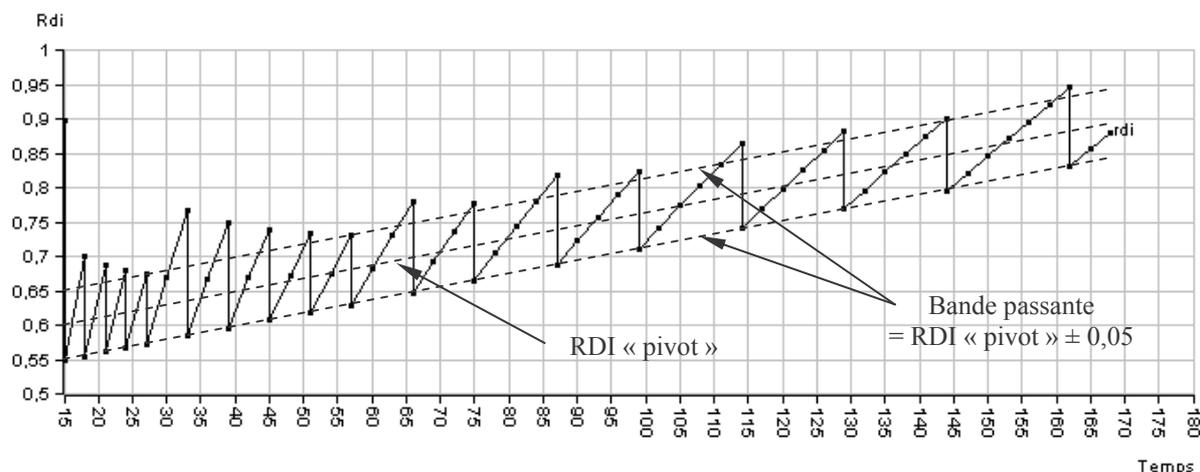


Figure A2 : Scénario sylvicole généré automatiquement dans Fagacées
 Un RDI « pivot » est fixé par les valeurs initiales et finales de RDI,
 ici 0,6 à 15 ans, et 0,9 à 168 ans
 La bande passante est égale à ce RDI « pivot » \pm 0,05.

Si trop d'éclaircies sont générées dans le jeune âge, cette méthode permet par contre d'automatiser les simulations et donc d'explorer un grand nombre de situations. D'autre part, une étude du phénomène a montré que l'influence de ce problème est quasi nulle sur le stock de carbone. Une étude économique serait plus perturbée par ce trop grand nombre d'éclaircies.

1.1 – 2. Pnl

Le modèle *Pnl*, pour le Pin noir laricio, a été développé par Céline MEREDIEU au cours de sa thèse (Merédieu 1998). Il est également intégré dans l'environnement CAPSIS.

Le fonctionnement de *Pnl* est très proche de celui de *Fagacées*. C'est également un modèle « arbre indépendant des distance », piloté par la croissance en hauteur dominante. Les différences se situent seulement au niveau des courbes de croissances et des paramètres des modèles.

Les éclaircies sont généralement définies par un nombre de tiges objectif, et un facteur représentant le type de prélèvement (*Kg* : surface terrière moyenne d'un arbre éclairci sur la surface terrière moyenne avant éclaircie).

Il n'y a pas d'automatisation des déclenchements d'éclaircies.

1.1 – 3. Simcop

A l'inverse des deux modèles précédents, le modèle *Simcop* développé par Jean-Marc OTTORINI pour la croissance des peuplements de Douglas (Ottorini *et al.* 2002) est un modèle « arbres dépendants des distances ». La croissance d'un arbre dépend donc de son environnement direct.

L'approche choisie consiste à déterminer les paramètres de croissance et de développement des branches et de la tige à partir de mesures effectuées sur des arbres abattus. Un ensemble de relations lie le développement du houppier à celui de la tige, de différents points de vue : importance et répartition de l'accroissement volumique annuel, effet de la concurrence sur la croissance en hauteur. Un système de logiciels permet de gérer les informations concernant la croissance individuelle, pour établir la croissance et le développement d'un groupe d'arbres constituant un peuplement. Cette approche détaillée permet de prédire de façon directionnelle – et, par conséquent, dissymétrique – l'expansion radiale du houppier de chaque arbre, la dynamique de sa base, et de connaître le potentiel de fermeture du peuplement pour un certain délai de temps, à la suite d'une éclaircie. Un programme (CrownMapView), résidant sur un micro-ordinateur (fonctionnant sous Mac OS X), avec lequel le client Web sait coopérer, permet la visualisation de la carte des houppiers pour le marquage des arbres à éclaircir. Des indicateurs sur le type d'éclaircies sont mis en place pour d'informer l'utilisateur sur l'éclaircie qu'il pratique.

I.2 – Comptabilité du carbone du peuplement

La comptabilité du carbone est un des éléments clefs de l'ensemble de l'étude, et les méthodes pour l'effectuer sont largement détaillées dans ce paragraphe pour ce qui concerne les arbres dans le peuplement, à savoir la tige, les houppiers, les feuilles et les racines. La matière organique du sol et les produits issus de l'exploitation forestière sont traités ultérieurement.

I.2 – 1. Carbone aérien ligneux

L'estimation du carbone des parties aériennes ligneuses d'un peuplement forestier peut se faire de multiples manières : il est courant d'utiliser les « facteurs d'expansion biomasse », permettant de passer du volume commercial à la biomasse du peuplement (Schroeder *et al.* 1997, Dupouey *et al.* 1999, Lehtonen *et al.* 2004, Van Camp *et al.* 2004). Nous utiliserons plutôt les tarifs de cubages à double entrée pour le volume total sur écorce développés au cours du DEA qui évitent la multiplication des erreurs (Vallet 2002, Vallet *et al.* 2005). A ces volumes, sont appliquées des infradensités et des taux de carbone de la matière sèche pour arriver à la quantité de carbone d'un individu.

L'utilisation d'un simulateur permet une souplesse particulière puisque les diamètres et hauteurs à chacun des pas de temps sont connus pour tous les individus. Il est alors possible d'utiliser un tarif de cubage à deux dates successives, et d'estimer le volume du cerne courant par différence. Des modèles cerne à cerne d'infradensité peuvent alors être employés.

I.2 – 1.1. Volumes aériens

Les tarifs de cubage pour le volume aérien total (découpe 0) sont basés sur l'estimation d'un facteur de forme (Vallet *et al.* 2005). Tous les volumes sont estimés sur écorce. On a alors :

$$volume = forme \times \frac{c_{130}^2 \times h_{tot}}{40\,000\pi} \quad [A1]$$

où c_{130} est la circonférence en centimètres, h_{tot} est la hauteur totale en mètres, *forme* est donné par l'équation [A2] :

$$forme = \left(a + b \times c_{130} + c \times \frac{c_{130}^{\frac{1}{2}}}{h_{tot}} \right) \cdot \left(1 + \frac{d}{c_{130}^2} \right) \quad [A2]$$

les paramètres a , b , c et d sont donnés dans le tableau A1 pour chacune des essences considérées.

	a	b	c	D
<i>Chêne sessile</i>	0.471	-0.000345	0.377	N_s
<i>Hêtre</i>	0.395	0.000266	0.421	45.4
<i>Pin laricio</i>	0.311	0.000405	0.340	191.0
<i>Douglas</i>	0.534	-0.000530	ns	56.6

Tableau A1 : Paramètres pour le modèle de forme (équation [A2])

Notons que le modèle utilisé pour le Pin laricio a été calibré sur des données de Pin sylvestre et de Pin maritime. L'essai de ce tarif sur 61 Pins laricio donne des résultats très corrects (figure A3).

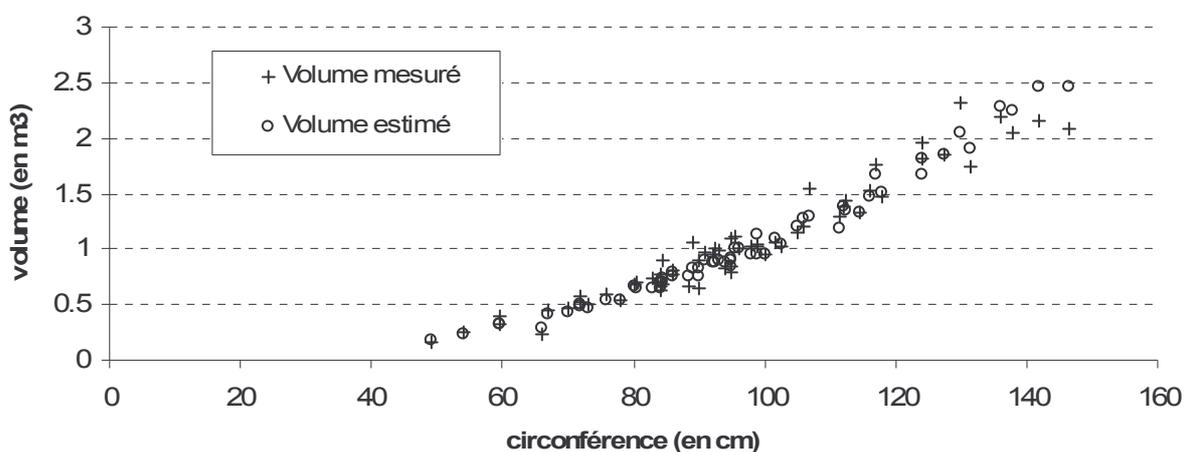


Figure A3 : Essai sur 61 Pins laricio du tarif calibré sur des données de Pins sylvestre et maritime

D'autre part, dans le cas du Chêne sessile et du Hêtre, les modèles d'infradensité utilisés sont indépendants de la hauteur, mais s'appliquent à la tige seule. L'indépendance avec la hauteur est confirmée dans le cas du Chêne sessile (Guilley 2000). Le volume des menus bois (branches et rameaux inférieurs à 7 cm de diamètre) du houppier a probablement une infradensité plus proche de celle des jeunes individus que de celle de la tige. En conséquence, les volumes seront calculés en deux parties : 1) le volume bois fort total donné par le tarif à double entrée de Bouchon (1982), 2) le volume des menus bois estimé comme la différence entre le volume bois fort et le volume total aérien précédemment présenté.

Pour le Pin laricio, le volume des menus bois est moindre par rapport au volume bois fort, et cette distinction n'est pas effectuée.

1.2 – 1.2. Densités et Infradensités

Des modèles de densité sèche à l'air ou d'infradensité dépendant de variables à une échelle fine comme la largeur de cerne sont utilisables grâce aux simulateurs donnant accès à ce type d'information pour tous les individus du peuplement. Les résultats sont beaucoup plus précis que des valeurs forfaitaires par essence, et permettent en outre de mieux prendre en compte l'influence de la sylviculture sur le stock de carbone puisque les rayons et largeurs de cerne, en particulier, en dépendent. Les modèles utilisés pour le Chêne sessile, le Hêtre et le Pin laricio sont donnés dans le tableau A2.

Le modèle pour le Hêtre ne concerne pas l'infradensité, mais la densité sèche à l'air. La différence entre les deux vient du retrait du bois au moment du séchage ainsi que de la quantité d'eau restant dans le bois (environ 12 %). En effet, l'infradensité est la masse de l'échantillon anhydre divisée par le volume à saturation, alors que la densité sèche à l'air est la masse divisée par le volume à 12 % d'eau résiduelle (Guilley 2000).

Pour connaître l'infradensité, il faut appliquer un coefficient de passage à la densité du Hêtre. Celui-ci est estimé en moyennant les valeurs disponibles dans la monographie du Hêtre (Tessier du Cros 1981). Le coefficient obtenu est 1,31.

Tous les volumes sont estimés sur écorce. Le volume d'un cerne annuel étant la différence des volumes sur écorce entre deux années successives, il contient donc également l'accroissement annuel de l'écorce, auquel on applique le même modèle d'infradensité.

Pour le Douglas, le calcul de la biomasse est intégré dans le simulateur *Simcop* et l'utilisation d'un modèle d'infradensité *a posteriori* n'est pas nécessaire. Une vérification est néanmoins effectuée et présentée dans le paragraphe suivant.

	Modèle	Valeurs des paramètres	Source / notes
<i>Chêne sessile</i>	$id = a + b_{type} + c \times ac + d \times lc$	$a = 554,83$ $b = -21,54$ (si cerne d'aubier) $b = 19,80$ (si cerne de duramen) $c = -0,676$ $d = 22,61$	Modèle développé par Gilles LE MOGUÉDEC, à partir d'un échantillon d'Edith GUILLEY (1999) L'infra-densité est bornée par 355 et 859.
<i>Hêtre</i>	$densité = a + b \times \exp(\text{rayon}/c) + d \times \text{rayon} \times lc^{\frac{1}{2}} + e \times (\text{date} - 1900)$	$a = 638,46$ $b = 162,34$ $c = -175,26$ $d = -0,551$ $e = 0,245$	Modèle développé par Jean-Daniel BONTEMPS (2005a), à partir de l'échantillon de DEA (Bontemps 2002)
<i>Pin laricio</i>	$id = a + b \times ac + c \times \frac{ac}{aCal} + d * lc$	$a = 352,3$ $b = 3,42$ $c = 92,09$ $d = -5,27$	Modèle développé par Jean-Michel LEBAN, à partir de l'échantillon de la thèse de Céline MEREDIEU (1998) Il s'agit uniquement de la partie fixe d'un modèle à effets aléatoires.
<i>Douglas</i>	Cas particulier : voir § A.1.3		
<u>Variables et unités :</u>			
	<i>id</i> : Infradensité en kg/m ³	<i>lc</i> : Largeur de cerne en mm	
	<i>densité</i> : Densité sèche à l'air en kg/m ³	<i>rayon</i> : Rayon en mm	
	<i>ac</i> : Age cambial en années (âge du cerne compté depuis la moelle)	<i>date</i> : date de formation du cerne	
	<i>aCal</i> : Age calendaire de l'arbre en années (âge de l'arbre)		

Tableau A2 : Modèles de densité ou d'infra-densité utilisés dans les simulations

1.2 – 1.3. Cas particulier du Douglas

Le simulateur *Simcop* employé pour faire évoluer les peuplements de Douglas calcule également les biomasses aériennes en sommant les contributions de chacune des branches de chacun des arbres du peuplement (Ottorini *et al.* 2002).

Par ailleurs, il est possible d'obtenir pour toutes les années la liste des arbres avec leur circonférence et leur hauteur, ce qui a permis d'utiliser les tarifs de cubage pour le volume total (Vallet *et al.* 2005), afin d'effectuer des comparaisons.

Une infradensité moyenne de 0,4 a été adoptée sur la base d'un rapport d'Ottorini pour un projet de la Communauté Européenne (Ottorini 1994). Le rapport propose un modèle précis, mais dans le cadre de la vérification, une valeur moyenne est suffisante.

La figure A4 montre l'excellente adéquation des résultats entre les deux méthodes travaillant pourtant à des échelles différentes : la première sommant de manière exhaustive les biomasses de toutes les branches et tiges (SIMCOP), et la seconde en utilisant des tarifs de cubage et une infradensité.

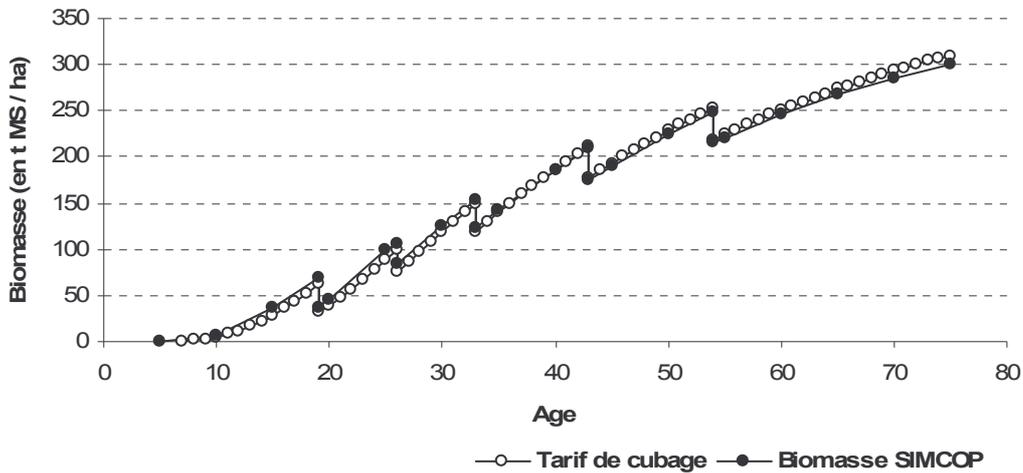


Figure A4 : Comparaison de deux estimations de biomasse : avec le tarif de cubage pour le volume total, et avec le simulateur SIMCOP

1.2 – 1.4. Taux de carbone

Pour toutes les essences et dans tous les compartiments ligneux de l'arbre (tiges, branches et racines), le taux de carbone est pris à 47,5 % de la matière sèche. Cette valeur est celle retenue dans le rapport CARBOFOR (Loustau 2004) estimant les stocks de carbone de la ressource nationale.

1.2 – 2. Systèmes racinaires

Les études de biomasses racinaires sont extrêmement onéreuses et délicates, en particulier pour les arbres de gros diamètre. En effet, excaver l'ensemble des racines d'un arbre adulte relève du défi. Il est alors difficile de trouver dans la bibliographie des relations précises. Drexhage et Colin (2001) ont fait une revue des relations allométriques disponibles pour 9 essences forestières, dont le Chêne sessile, le Hêtre et le Douglas qui nous intéressent pour la thèse. En revanche, les recherches bibliographiques sur les biomasses racinaires du Pin laricio sont restées parfaitement infructueuses, ce qui a conduit à utiliser à défaut les résultats du Pin sylvestre. Le tableau A3, extrait de l'article de Drexhage et Colin, récapitule les relations utilisées dans cette étude.

	Région	Age	n	Diamètre (cm)	Source
<i>Chêne sessile</i>	Nord-Est France	20 – 28	55	7 – 17	(Drexhage <i>et al.</i> 1999)
<i>Pin sylvestre</i>	Sud Finlande	8 – 55	20	4 – 24	(Laiho et Finer 1996)
<i>Hêtre</i>	Nord Allemagne	100 – 115	8	12 – 47	(Pellinen 1986)
<i>Hêtre</i>	Nord-Est France	24 – 35	16	3 – 20	(Le Goff et Ottorini 2001)
<i>Douglas</i>	Oregon, USA	45 – 70	82	22 – 53	(Thies et Cunningham 1996)

Tableau A3 : Caractéristiques des travaux utilisés pour les systèmes racinaires

La figure A5 montre les biomasses racinaires en fonction du diamètre pour le Chêne sessile, le Hêtre et le Pin sylvestre, sur le domaine de calibration. Pour le Hêtre, il s'agit d'un modèle de Le Goff et Ottorini (2001), un modèle développé par Pellinen (1986) pour de plus gros individus est montré plus loin.

On observe sur cette figure que sur le domaine de calibration, les trois modèles sont très proches, ce qui est d'autant plus remarquables que les types de systèmes racinaires sont différents entre les trois essences. Le Hêtre à un système en cœur, le Pin en pivot et le Chêne en pivots multiples (Köstler *et al.* 1968).

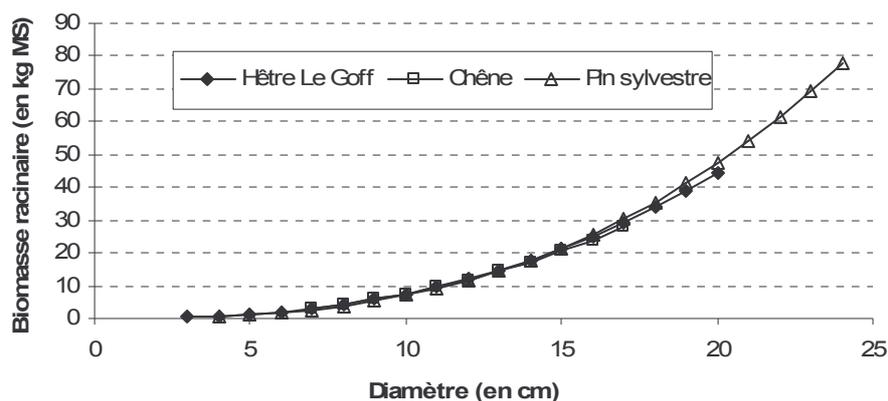


Figure A5 : Relations allométriques entre le diamètre et la biomasse racinaire
Modèles de Le Goff et Ottorini pour le Hêtre (2001), Drexhage pour le Chêne (1999),
et Laiho et Finer (1996) pour le Pin sylvestre

La figure A6 montre les mêmes modèles sur le domaine ou il faudrait les utiliser pour l'étude. Le modèle de Pellinen pour le Hêtre est également indiqué, ainsi que le modèle Douglas.

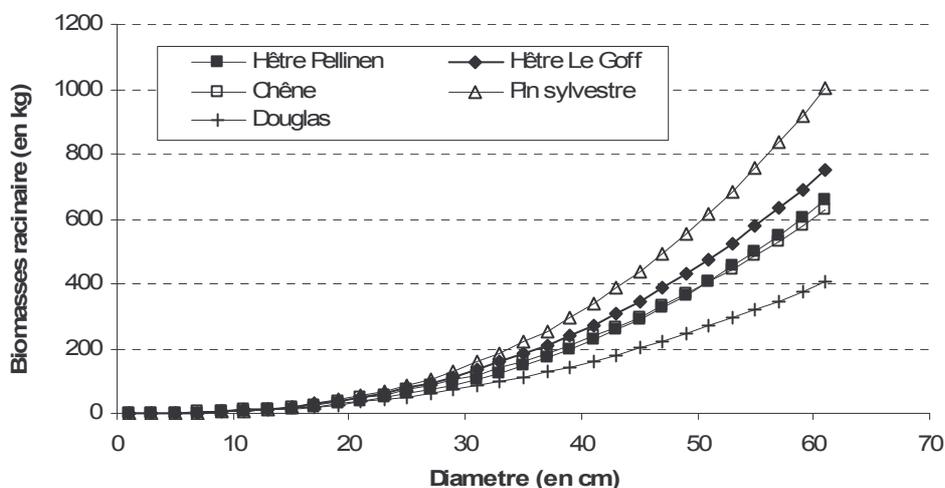


Figure A6 : Comportement des relations allométriques en extrapolation

Il apparaît qu'en extrapolation, 1) les deux modèles de Hêtre ne sont pas très proches. Celui de Pellinen, pour lequel les données correspondent à des arbres jusqu'à 47 cm de diamètre, est en dessous de celui de Le Goff et Ottorini. 2) le modèle pour le Chêne sessile de Drexhage (1999) rejoint celui de Pellinen pour les diamètres élevés. 3) le modèle pour le Pin sylvestre diverge très fortement. 4) le modèle Douglas est largement en dessous des autres.

Finalement, la figure A7 montre le modèle de Drexhage pour le Chêne sessile avec les 8 observations pour le Hêtre de Pellinen. On remarque alors que ce modèle ne se comporte pas plus mal que celui de Pellinen.

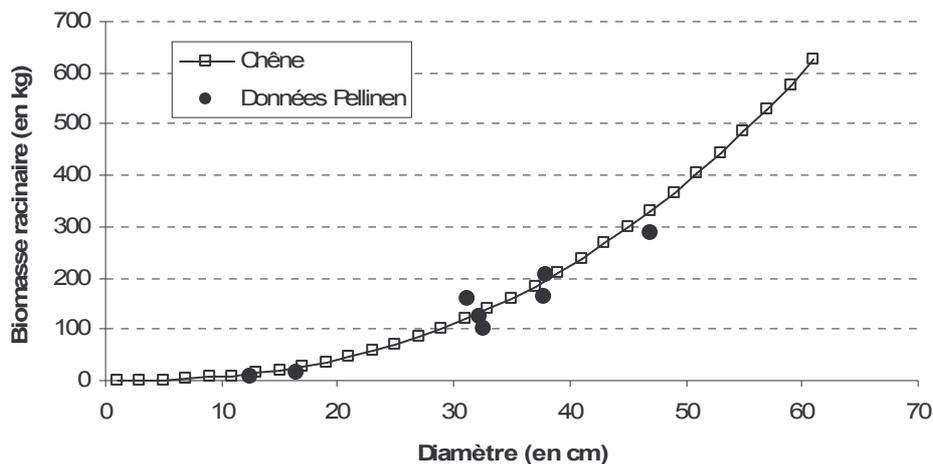


Figure A7 : Modèle Chêne sessile de Drexhage et observations de Hêtre de Pellinen

En conclusion, puisque les trois modèles de Chêne sessile, Hêtre (de Le Goff) et Pin sylvestre sont très semblables sur leurs domaines de calibration, c'est-à-dire pour les petits arbres, et que le modèle Chêne est également en bonne adéquation avec les observations de Pellinen pour les arbres plus gros, les seuls pour lesquels des données sont disponibles, il sera utilisé pour les

trois essences. La simplification est osée, mais probablement meilleure que l'extrapolation des modèles à des valeurs auxquels ils ne correspondent pas.

De plus, lorsque l'on simule avec Fagacées un peuplement de Chêne sessile avec une fertilité moyenne (26m à 100 ans) pour une sylviculture moyenne, et un peuplement de Pin laricio moyen avec *Pnl*, les rapports des biomasses racinaires des peuplements sur les biomasses aériennes totales (figure A8) donnent des résultats en accord avec la littérature (Dupouey *et al.* 1999, Dupouey 2002, Loustau 2004). En effet, les ordres de grandeur et la diminution des ratios pour les jeunes âges sont cohérents.

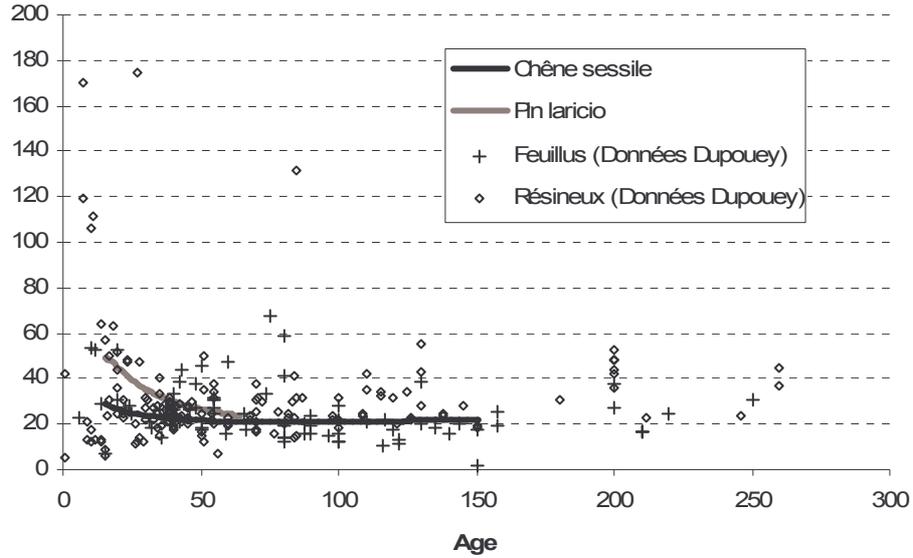


Figure A8 : Pourcentage de biomasse racinaire par rapport à la biomasse aérienne du peuplement pour des peuplements simulés de Chêne sessile et de Pin laricio. Les données proviennent d'une étude bibliographique de Dupouey (2002)

Pour le Douglas, les valeurs sont très différentes, et le modèle de Thies et Cunningham (1996), calibré avec un nombre d'individus plus important et les plus gros diamètres (82 arbres jusqu'à 53 cm de diamètre), est conservé.

Le bilan est donné dans le tableau A4.

Essences concernées	Modèle	Source
Chêne sessile, Hêtre Pin laricio	$\log_{10}(\text{biomasse}) = -1,56 + 2,44 \times \log_{10}(d_{130})$	(Drexhage <i>et al.</i> 1999)
Douglas	$\log_{10}(\text{biomasse}) = -1,55 + 2,33 \times \log_{10}(d_{130})$	(Thies et Cunningham 1996)

Tableau A4 : relations allométriques entre le diamètre et la biomasse
biomasse est la biomasse racinaire sèche en kg,
 d_{130} est le diamètre en cm

A titre de vérification également, il est possible d'estimer la biomasse racinaire d'un peuplement de hêtres dans des conditions similaires à l'étude de Kodrik sur les systèmes racinaires (Kodrik 2002, Kodrik et Barna 2002). L'auteur indique que le peuplement comporte 160 tiges/ha, avec un diamètre moyen de 37,5 cm.

En utilisant ces valeurs moyennes – il faudrait plutôt utiliser la distribution des diamètres puisque le modèle n'est pas linéaire, mais l'information n'est pas disponible – le modèle de Drexhage donne une biomasse racinaire de 30,5 t/ha, alors que Kodrik estime celle de ses peuplements à 27,3 t/ha. Le résultat est très correct.

1.2 – 3. Carbone foliaire

Une part faible, mais non négligeable de carbone est située dans les systèmes foliaires. Cependant, des arguments autorisent à penser que l'effet de la sylviculture est minime sur ce compartiment. En effet, lorsque les éclaircies sont pratiquées, trois phénomènes se produisent : 1) de la lumière est apporté au sous étage qui développe plus de feuilles, 2) l'irradiation étant supérieure, les arbres développent proportionnellement plus de feuilles de lumière, plus épaisses, 3) la canopée se referme très rapidement.

Ces trois facteurs ainsi que le faible stock de carbone foliaire par rapport aux autres compartiments, autorisent à négliger l'effet de la sylviculture sur le carbone foliaire pour l'objectif de l'étude. On retiendra alors les valeurs moyennes issues du rapport Carbofor de 7,8 t MS/ha pour les résineux et 3,1 t MS/ha les feuillus (Loustau 2004).

De plus, en utilisant les pourcentages de carbone dans la matière sèche calculés avec les données du réseau RENECOFOR (cf. §A.II.4 – 1.5 ci-après) on obtient des stocks de 1,57 tC/ha pour les feuillus et de 4,13 tC/ha pour les résineux.

1.3 – Discussion

Les modèles de croissance utilisés pour les quatre essences sont basés sur des mesures dendrométriques nombreuses. Ils ne permettent pas d'extrapoler la croissance des peuplements dans des conditions de changements climatiques ou stationnels (comme une élévation des températures, un accroissement des taux de CO₂ dans l'atmosphère, ou bien des dépôts azoté supérieurs), mais ils possèdent une robustesse qui les rend très fiables pour le type d'utilisation qui en est faite pour cette étude.

Le point le plus critique dans cette partie n'est alors pas la croissance des arbres, mais plutôt la comptabilité du carbone, qui comporte de nombreuses sources d'erreurs possibles (Dupouey et Pignard 2001).

L'estimation des volumes de bois fort (tiges et branches de section supérieure à 7 cm) a été largement étudiée en raison de la valeur commerciale de ces bois. En revanche, les études concernant les volumes totaux sont assez lacunaires. Certaines études avaient été menées à partir des années 1970 suite aux chocs pétroliers pour connaître les potentialités en biomasse des forêts pour l'énergie que l'on peut en tirer (Pardé 1977, 1980, Bouchon *et al.* 1981). Une deuxième vague de travaux d'estimation des volumes a vu le jour depuis la prise de conscience des effets des gaz à effet de serre depuis dix ans environ (Dupouey *et al.* 1999, Pignard *et al.* 2000). Dans le cadre du projet Carbofor pour évaluer les stocks de carbone des forêts françaises (Loustau 2004), une nouvelle méthode d'estimation a été mise en place (Vallet 2002, Loustau 2004, Vallet *et al.* 2005) et permet de s'affranchir des facteurs d'expansion branches pour estimer les volumes

aériens totaux des individus (jusqu'à la découpe 0). Cette analyse a été menée sur plus de 4500 arbres et donne des résultats robustes.

Ces tarifs de cubage ont été utilisés ici pour estimer les volumes dans le cas du Chêne sessile, du Hêtre et du Pin laricio. Pour le Douglas, nous avons vu qu'il y a une très bonne adéquation entre les résultats fournis par *Simcop* et ces tarifs de cubage.

Pour estimer la biomasse de la partie aérienne, ces volumes doivent être multipliés par les infradensités (masse anhydre divisée par le volume saturé d'eau). Des modèles existent pour les essences considérées et ont été présentés. Ces modèles sont calibrés sur un grand nombre d'individus et sont fiables ; ils ont été utilisés pour calculer des infradensités cerne à cerne à 1,30 m de hauteur, et la valeur obtenue a été utilisée pour l'ensemble du cerne considéré, à toutes les hauteurs dans l'arbre.

Deux éléments permettent d'estimer que cette simplification ne porte pas à conséquence. Dans le cas du Chêne sessile, Guilley (2000) indique que pour cette essence, la densité varie peu en fonction de la hauteur, lorsqu'on reste dans un même cerne. Dans le cas du Pin laricio, l'âge cambial est la variable la plus influente sur l'infradensité, or celui-ci est compté depuis l'écorce et reste donc le même quelle que soit la hauteur lorsque l'on reste dans un même cerne. Une autre variable du modèle est la largeur de cerne, qui varie en fonction de la hauteur dans l'arbre. Mais cette variable est bien moins influente (Leban *et al.* 2001). Une différence de 2 millimètres sur la largeur de cerne induit une variation de l'infradensité de $10,5 \text{ kg/m}^3$, ce qui est faible au regard de l'infradensité moyenne ($\sim 500 \text{ kg/m}^3$).

L'utilisation de l'infradensité à 1,30 m pour l'ensemble du cerne n'est alors pas un problème.

En revanche, le modèle utilisé pour le Hêtre est un modèle de densité sèche à l'air, et non d'infradensité. La différence entre les deux est grande puisqu'il reste environ 12% d'eau dans un échantillon séché à l'air, et que le bois subit un gonflement volumique lorsqu'il est humide. Le passage de la densité sèche à l'air à l'infradensité se fait par un simple coefficient, évalué grâce aux valeurs données par Nepveu dans la monographie du Hêtre (Tessier du Cros 1981). Les estimations de biomasse des peuplements de Hêtre gagneraient en précision en utilisant plutôt un modèle d'infradensité (non disponible actuellement).

Si les calculs de biomasse de la partie aérienne sont assez précis, la biomasse racinaire l'est en revanche beaucoup moins, alors qu'elle représente un stock important avec environ 20 à 25 % de la biomasse aérienne. Le travail de synthèse de Drexhage et Colin (2001) sur les relations allométriques par essence disponibles dans la littérature entre la biomasse racinaire et le diamètre de l'arbre montre bien le peu d'études sur le sujet, en particulier pour les plus gros individus. L'utilisation d'une relation unique pour le Chêne sessile, le Hêtre et le Pin laricio a été justifiée dans ce chapitre par i) le manque de données permettant de faire mieux ii) la proportion correcte de la biomasse racinaire sur l'ensemble du peuplement engendrée par ces relations par rapport à la biomasse aérienne.

Finalement, un dernier point pourrait être amélioré : le taux de carbone de la matière sèche a été fixé à 0,475 pour l'ensemble des essences alors qu'il existe peut-être des différences inter- et intra-spécifiques. Par exemple, les valeurs utilisées pour les feuillus dans les différents pays européens pour les bilans de carbone à l'échelle nationale vont de 0,45 à 0,50 (Loustau 2004). Cette variation qui pourrait à première vue paraître minime engendre une différence de 10% sur le stock de carbone de la biomasse.

Chapitre II – Le carbone du sol

La prise en compte de l'ensemble du cycle du carbone impliqué dans la filière forêt-bois passe entre autres par les sols. Pour l'ensemble des forêts françaises, le stock de celui-ci est évalué à plus de la moitié du stock global du peuplement (Dupouey *et al.* 1999). Dans une approche plus locale, des mesures de carbone dans un peuplement mixte de Chêne sessile et de Hêtres de 80 ans dans les Flandres en Belgique sont semblables puisque 52,5 % du carbone se situe dans le sol (Vande Walle *et al.* 2001). Ce compartiment est donc majeur du point de vue du stock de carbone mais il reste très mal connu (Malhi *et al.* 1999, Pignard *et al.* 2000). De plus, malgré les incertitudes quant aux estimations de stockage dans le sol, il pourrait être un « puits » très important en Europe de l'Ouest (Liski *et al.* 2002).

L'objectif de ce chapitre est de montrer comment l'aspect sol a été pris en compte et intégré dans la chaîne de modèles. La démarche a été de sélectionner un modèle dynamique du carbone du sol dans la littérature, puis de légitimer son utilisation grâce aux résultats d'un modèle statique élaboré sur des données indépendantes. Les résultats sur le stockage pour les deux stratégies explorées pendant la thèse sont exposés dans la partie B.

II.1 – Analyse bibliographique

Afin de simuler l'évolution du carbone du sol dans les conditions souhaitées, il est nécessaire d'utiliser un modèle dynamique. Or l'élaboration de ce type de modèle est extrêmement gourmande en données qui de plus sont très coûteuses et longues à obtenir. En effet, il faudrait échantillonner un grand nombre de forêts à des dates successives pour un phénomène souterrain, ce qui est toujours très délicat à réaliser. Il apparaît alors clairement que ce n'est pas un programme réaliste dans le cadre d'une thèse. En outre, la littérature regorge de modèles d'évolution du sol. Une analyse détaillée de la bibliographie permet de sélectionner le modèle le plus adapté aux besoins de l'étude.

II.1 – 1. Les modèles de la littérature

Les modèles de sols sont très nombreux dans la littérature mais n'ont pas tous les mêmes fonctions. Le choix doit alors s'effectuer soigneusement suivant des critères objectifs. Le modèle sélectionné devra avoir :

- des sorties correspondant au sujet étudié (stocks de carbone du sol),
- des entrées suffisamment simples pour être accessibles,
- des échelles spatio-temporelles pertinentes pour l'étude (de l'ordre de l'hectare et avec un pas de temps au minimum hebdomadaire) pour éviter l'accumulation des biais systématiques,
- une robustesse qui permette de l'intégrer dans la chaîne de modèle de l'étude *a priori* en dehors du domaine de validation,
- si possible un consensus scientifique, garant de la fiabilité de son utilisation.

Les modèles d'évolution du sol se classent en quatre groupes (Jenkinson 1990). Le premier rassemble les modèles à un seul compartiment et sont très simples, mais trop peu précis. Le second, légèrement plus évolué, comporte deux compartiments, un à décomposition lente et l'autre à décomposition rapide. Le troisième groupe est celui des modèles sans compartiments, mais avec un continuum. Ceux-ci sont très complexes. Enfin, les plus utilisés, en particulier pour les approches sur le long terme, sont les modèles à multi-compartiments, qui présentent le double

avantage d'une facilité de programmation et d'utilisation et d'une intéressante possibilité de détail dans la description.

Même lorsque seulement ces derniers modèles sont sélectionnés, il en reste un grand nombre. Divers comparatifs ont déjà fait lieu de rapports (Homann *et al.* 2000, Grogan et Matthews 2001, Trettin *et al.* 2001), ou même de numéros spéciaux de revues scientifiques (Smith *et al.* 1997). Des groupes de travail internationaux sont consacrés à ces études, comme le GCTE SOMNET (Global Change and Terrestrial Ecosystems Soil Organic Matter Network) auprès desquels de précieuses informations sont disponibles en ligne (<http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/aen/somnet/index.htm>), ou le LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry) (Sozanska *et al.* 2002).

Parmi les 26 modèles dynamiques du carbone du sol éligibles après une première recherche bibliographique, des sélections successives ont abouti à n'en conserver que deux : le modèle Roth-C (Jenkinson 1990, Coleman et Jenkinson 1996, 1997, Paul *et al.* 2003) et le modèle *Century* (Parton *et al.* 1987, Kelly *et al.* 1997), tous deux présentant tous les critères requis, avec en particulier des échelles de temps et d'espaces convenant à l'étude, et un bon comportement sur l'évolution à long terme (Coleman et Jenkinson 1997, Kelly *et al.* 1997). Grâce à l'aide des spécialistes du domaine, et en particulier de Daniel EPRON, Professeur à l'Université Nancy I, le choix entre ces deux modèles s'est porté sur le second, la différence entre les deux n'étant en réalité pas fondamentale.

II.1 – 2. Le modèle *Century*

Le modèle *Century* fut développé aux Etats-Unis par Parton, et sa description publiée dès 1987 (Parton *et al.* 1987). Ce modèle est assez ancien et pourtant toujours très utilisé par la communauté scientifique, comme l'atteste l'étendue de la bibliographie qui le relate : le site Internet consacré au modèle (<http://www.nrel.colostate.edu/projects/century5/>) recense à lui seul 94 articles scientifiques directement liés à ce modèle. Son objectif est de décrire l'évolution du sol au cours du temps. Nous n'utilisons dans le cadre de la thèse que sa sous-partie consacrée au carbone.

Sept compartiments composent ce modèle (Figure A9). Les trois compartiments principaux sont appelés « Actif », « Lent » et « Passif » en raison de cinétiques de décomposition de la matière organique différentes. Elles s'expliquent par des protections physiques (comme la profondeur) ou chimiques (molécules plus ou moins facilement décomposables) entraînant des turnovers différents. Quatre autres compartiments, dits « Structurels » et « Métaboliques » sont des passages intermédiaires entre les apports de carbone aériens et souterrains et les compartiments précédemment décrits. De nouveau, le caractère plus ou moins récalcitrant à la décomposition par les micro-organismes induit cette séparation. L'indicateur choisi pour définir la qualité des apports carbonés, et donc la répartition entre ces compartiments est le rapport Lignine / Azote.

Les lois de décomposition de chacun de ces compartiments sont identiques, excepté les constantes de décomposition. Elles sont régies par l'équation différentielle suivante : la variation de stock de carbone pendant un pas de temps – égal à une semaine – est une proportion du stock qui dépend de la constante de décomposition intrinsèque au compartiment, ainsi que d'une fonction de la température, et d'une fonction de l'humidité (Parton *et al.* 1987). Nous avons alors pour le compartiment i :

$$\frac{dC_i}{dt} = -K_i \cdot f(T) \cdot g(M) \cdot C_i + A_i \quad [A3]$$

où $\frac{dC_i}{dt}$ est la quantité sortant du compartiment i pendant l'intervalle de temps dt ,

K_i est la constante de décomposition intrinsèque au compartiment i ,

$f(T)$ est une fonction de la température (à la date considérée),
 $g(M)$ est une fonction de l'humidité (à la date considérée),
 A_i sont les apports en carbone en entrée du compartiment i pendant l'intervalle de temps dt .

À chaque pas de temps dt , la quantité de carbone sortant de chaque compartiment $\frac{dC_i}{dt}$ est calculée : une partie est dégagée sous forme de CO_2 et le reste est réparti entre les autres compartiments. Les règles de répartition entre CO_2 relâché et le reste dépendent de chaque compartiment, et sont généralement de l'ordre de 50 %.

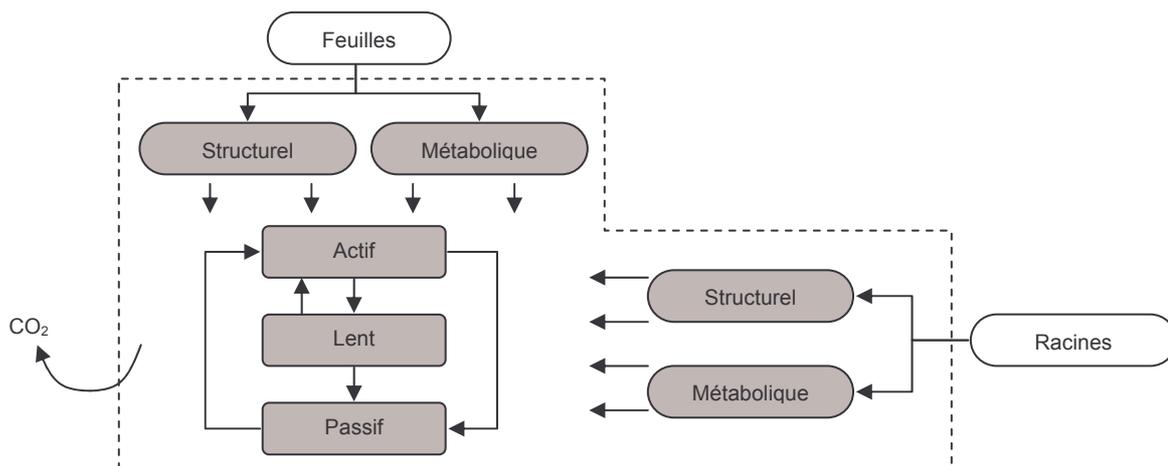


Figure A9 : Description schématique du modèle Century
 Les compartiments appartenant au modèle sont grisés, et encadrés en pointillés

II.2 – Analyse de sensibilité de Century

Une analyse de sensibilité permet de mettre en évidence l'influence qu'un paramètre d'entrée peut avoir sur un critère de sortie à définir. Par exemple, il paraît évident dans la description de *Century* que les facteurs climatiques vont influencer sur les stocks de carbone, et l'analyse de sensibilité indiquera de manière quantitative la mesure de ces variations, et si la température a plus ou moins de poids dans ces variations que la pluviométrie.

II.2 – 1. Méthode et critères utilisés

Le modèle *Century* a été implémenté en java et des programmes d'exécution automatiques ont permis d'effectuer un grand nombre de simulations. Les paramètres utilisés sont ceux de la version initiale de *Century* (Parton *et al.* 1987, Parton *et al.* 1994).

Afin de se placer dans un cadre cohérent quant aux conditions climatiques, pédologiques et relatives aux apports de carbone, les données des réseaux européen et RENECOFOR (cf. §A.III ci-après) ont été moyennées pour calculer des conditions dans lesquelles se trouvent les peuplements forestiers français. Les valeurs sont calculées en effectuant la moyenne arithmétique des conditions de l'ensemble des points deux réseaux (figure A10 et tableau A5). Nous obtenons ainsi une bonne représentativité des conditions des forêts françaises. À ce point, par simplicité, les apports souterrains sont pris égaux aux apports aériens.

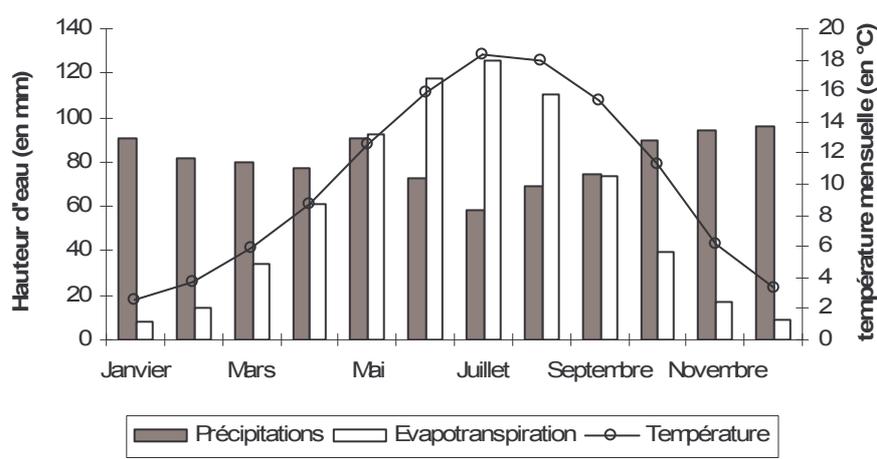


Figure A10 : Conditions climatiques moyennes mensuelles (moyennes des points des réseaux Européen et RENECOFOR)

Chutes de litière	Rapport Lignine / Azote	Pourcentage Limon + argile
2,205 tC/ha	31,5	60 %

Tableau A5 : Valeurs moyennes des entrées de Century (moyennes des points des réseaux Européen et RENECOFOR)

La variable de sortie la plus naturelle pour comparer les simulations entre elles est le stock de carbone global, c'est à dire la somme du carbone des sept compartiments du modèle. De plus, pour que les comparaisons entre simulations aient un sens, nous avons choisi de prendre les valeurs après obtention d'un régime permanent. Dans un premier temps, nous l'avons défini comme le moment où la variation relative de stock de carbone entre deux années successives est inférieure à un seuil (en pratique 10^{-6}). Ensuite, pour homogénéiser l'ensemble des simulations, nous avons choisi un temps supérieur à toutes les simulations précédentes, soit 10 000 ans. Une représentation schématique est donnée figure A11.

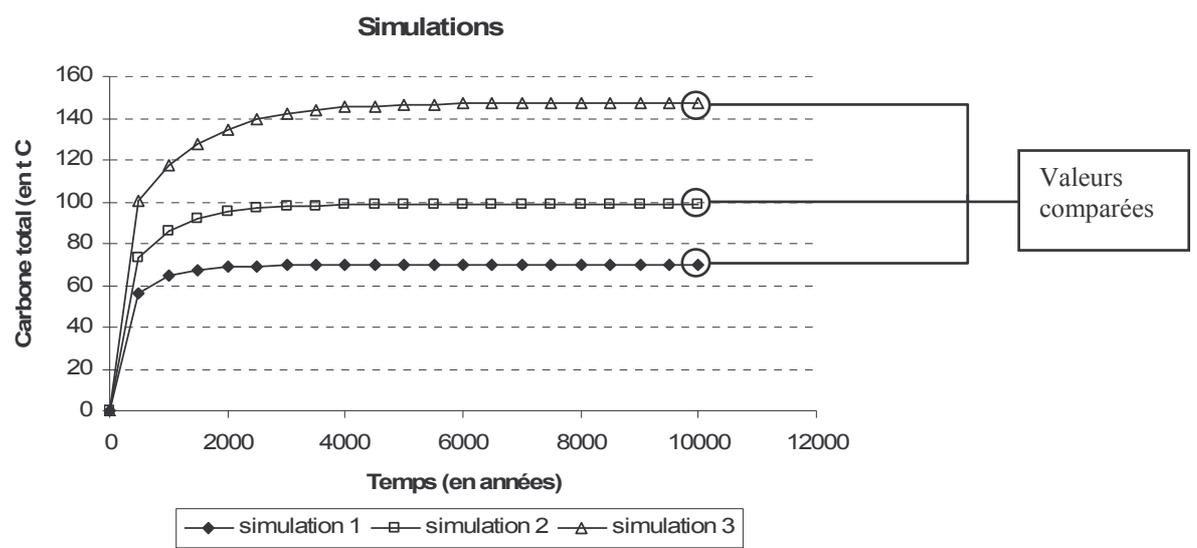


Figure A11 : critère de comparaison des simulations lors de l'analyse de sensibilité

On peut classer les éléments à tester grâce à l'analyse de sensibilité en deux grands types : i) les paramètres internes au modèle, avec en particulier les constantes de décomposition de chacun des sept compartiments, ii) le forçage climatique, iii) les variables d'entrée comme les quantités de chutes de litière, le rapport lignine / azote ou la texture du sol.

Une recalibration de l'ensemble des paramètres n'est pas un objectif de la thèse et les données disponibles ne le permettent pas, en particulier car ce sont des données statiques et non dynamiques. Ainsi, l'analyse de sensibilité sera effectuée sur les deux types d'élément : i) sur les paramètres du modèle afin de connaître l'étendue de ce à quoi l'accès est réduit, ii) sur les variables d'entrée dans le but de mettre un accent particulier sur l'obtention des plus sensibles.

II.2 – 2. Effet des constantes de décomposition

Les sept compartiments du modèle ont exactement le même fonctionnement. Ils sont tous régis par la même équation différentielle (équation [A3]). Les seules différences sont les constantes de décomposition, qui font d'eux des compartiments où le carbone est réfractaire à la décomposition, ou bien est plus rapidement réduit en CO₂ et transféré dans d'autres compartiments. Les autres différences sont les apports hebdomadaires de carbone qu'ils reçoivent, qui découlent des décompositions des autres compartiments.

Ces constantes ont alors un rôle clef dans le fonctionnement du modèle. Une analyse de sensibilité a permis d'en montrer l'importance.

Pour cette analyse, il est impensable de faire varier les sept constantes simultanément. En effet, une simulation dure trois à cinq secondes, donc si chacune des constantes prend dix valeurs, cela représente dix millions de simulations, soit environ un an et demi de calcul avec un ordinateur déjà puissant ! En conséquence, il a été choisi de faire varier les constantes par groupes : d'abord les compartiments de transition (i.e. compartiments « Structurels » et « Métabolique »), puis les compartiments majeurs (« Actif », « Lent » et « Passif »), enfin des combinaisons des deux.

Les résultats des simulations montrent une forte sensibilité du stock de carbone à l'équilibre à ces constantes. Cependant, lorsqu'une de ces constantes de décomposition prend des valeurs différentes, seul le compartiment associé à cette constante varie, ce qui induit une variation du stock global. On observe pour chacun des compartiments une dépendance inversement proportionnelle du stock de carbone à la valeur de la constante.

Il est possible de donner une justification théorique à cela. En effet, chaque compartiment suit l'équation différentielle [A3], où $f(T)$ et $g(M)$ varient avec le temps puisque la température (T) et l'humidité (M) varient dans l'année. Les fonctions f et g sont complexes, ce qui rend l'équation [A3] impossible à intégrer analytiquement. De plus, les apports de carbone A_i sont également dépendants du temps.

Néanmoins, quelques hypothèses permettent de simplifier cette équation : i) les températures ii) l'humidité et iii) les apports de carbone seront supposés uniformes sur l'année. Ce sont des hypothèses fortes, et la dépendance de ces variables sera étudiée dans les prochains paragraphes.

Avec ces simplifications, l'équation [A3] peut alors s'intégrer facilement. C'est une équation différentielle du premier ordre dont la solution générale est égale à la somme de la solution de l'équation homogène associée [A4] ($C_{H,i}$) et d'une solution particulière de l'équation générale [A3] ($C_{P,i}$).

$$\frac{dC_{H,i}}{dt} = -K_i \cdot f(T) \cdot g(M) \cdot C_{H,i} \quad (\text{Equation Homogène}) \quad [A4]$$

La solution homogène est à variables séparables et peut s'écrire

$$\frac{dC_{H,i}}{C_{H,i}} = -K_i \cdot f(T) \cdot g(M) \cdot dt$$

ce qui s'intègre en

$$C_{H,i}(t) = \alpha \cdot \exp(-K_i \cdot f(T) \cdot g(M) \cdot t)$$

En supposant que les apports carbonés sont répartis régulièrement sur l'année, une solution particulière immédiate de [A3] est une solution constante puisque dans ce cas, $dC_{P,i} / dt = 0$, alors

$$C_{P,i}(t) = \frac{K_i \cdot f(T) \cdot g(M)}{A_i}$$

Enfin, si l'on considère que le stock de carbone initial ($t = 0$) est nul, ce que l'on utilise en pratique pour les simulations, alors la fonction du stock de carbone au cours du temps pour le compartiment i est une croissance exponentielle vers une asymptote :

$$C_i(t) = \frac{A_i}{K_i \cdot f(T) \cdot g(M)} \cdot (1 - \exp(-K_i \cdot f(T) \cdot g(M) \cdot t)) \quad [A5]$$

D'où, lorsque t tend vers l'infini, c'est-à-dire lorsqu'on a atteint le régime permanent, on obtient le stock suivant :

$$C_i(\infty) = \frac{A_i}{K_i \cdot f(T) \cdot g(M)} \quad [A6]$$

Ainsi, pour chacun des sept compartiments, la valeur à l'équilibre est donnée par l'équation [A6], ce qui justifie un stock de carbone de ce compartiment inversement proportionnel à sa constante de décomposition.

De plus, lorsqu'on atteint l'équilibre, par définition, le flux entrant est égal au flux sortant. Et comme le flux entrant dans un compartiment ne dépend pas de sa constante, alors le flux sortant non plus, ce qui explique que l'effet d'une modification de la constante d'un compartiment n'influe pas sur les stocks des autres compartiments.

II.2 – 3. Effet de la température

La température joue un rôle majeur dans la décomposition de la matière organique, au moins lorsque l'humidité n'est pas un facteur limitant (Edmonds 1979, Epron *et al.* 1999). Ce résultat est également valable pour la décomposition des racines (Chen *et al.* 2000). En effet, il est généralement admis qu'avec le froid, l'activité des micro-organismes est réduite, alors qu'elle est accélérée quand la température augmente et que cela conduit à une décomposition accrue (Moore *et al.* 1999, Berg et McLaugherty 2002).

Cependant, Melillo *et al.* supposent que cet effet est de portée limitée en raison de la faible quantité de carbone labile et la variation de stock peut être compensée, en cas d'augmentation des températures à long terme, par l'augmentation de productivité qu'elle engendre également (Melillo *et al.* 2002).

En revanche, à des températures trop élevées, la mort de certains organismes entraîne un ralentissement de la décomposition. Dans le modèle *Century*, la fonction régissant l'impact de la température est une fonction de Poisson généralisée (Parton *et al.* 1987, 1994). A un temps donné, elle est la même pour tous les compartiments du modèle.

$$f(T) = \left(\frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\text{opt}}} \right)^{0,2} \times \exp \left[\frac{0,2}{2,63} \left(1 - \left(\frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\text{opt}}} \right)^{2,63} \right) \right] \quad [A7]$$

La température maximale est $T_{\max} = 45^{\circ}\text{C}$.

Le maximum de la fonction est obtenu pour la température optimale $T_{\text{opt}} = 35^{\circ}\text{C}$.

La figure A12 illustre la fonction de la température.

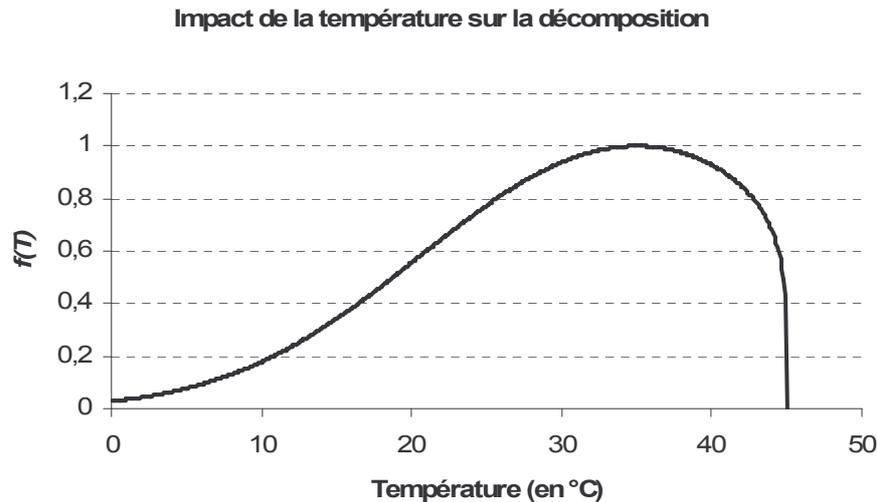


Figure A12 : Impact de la température sur la décomposition lors d'un pas de temps de la simulation

II.2 – 3.1. Sensibilité de la température moyenne

Pour appréhender l'impact de la température moyenne sur les simulations avec *Century*, les conditions moyennes telles que définies au paragraphe A.II.2 – 1. ont été utilisées, à l'exception des températures mensuelles fixées à une température donnée pour l'ensemble de l'année, différente à chaque simulation. Ces températures varient de 5 à 30 degrés.

Le résultat fait apparaître une dépendance très importante avec la température (figure A13). Pour les températures les plus faibles, le stock de carbone vaut environ 250 t C / ha, et 20 t C / ha pour les plus fortes. La diminution en fonction de la température est proche d'une décroissance exponentielle.

Moyennant les mêmes approximations que dans le paragraphe A.II.2 – 2., il est de nouveau possible de résoudre de manière théorique la dépendance du stock global de carbone avec la température moyenne. En effet, chacun des 7 compartiments du modèle suit l'équation différentielle [A3]. Ainsi, avec les hypothèses d'approximation effectuées, tous les compartiments ont une valeur de carbone à l'équilibre donnée par l'équation [A6], et présentent la même dépendance avec la température. Il vient alors que sur le stock global de carbone, le terme $1/f(T)$ est en facteur, avec f définie par l'équation [A7]. Cet impact théorique est parfaitement conforme aux simulations de la figure A13.

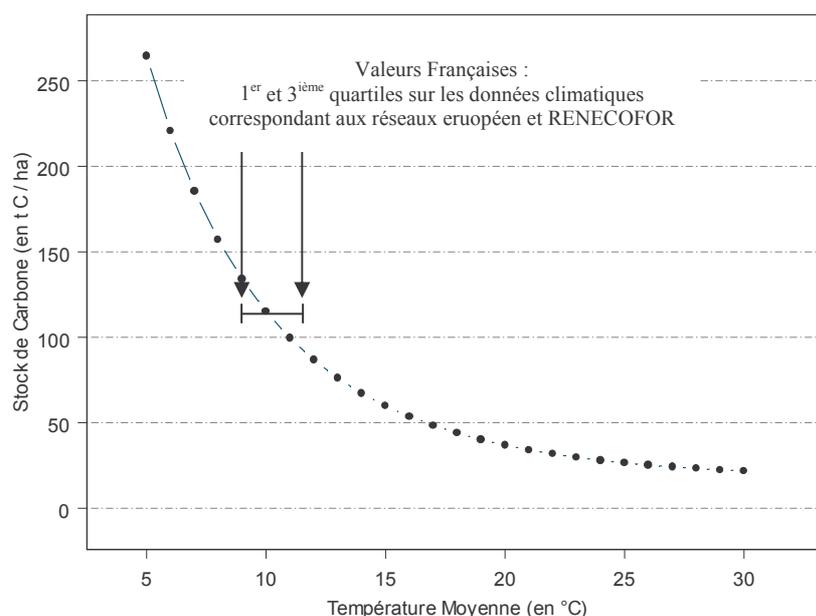


Figure A13 : Impact simulé de la température moyenne annuelle (supposée constante) sur le stock de carbone après obtention d'un régime permanent

En particulier, cela permet d'appréhender l'effet de la température à l'échelle de la France. Les données climatiques obtenues à l'aide du modèle *Aurelhy* de Météo France (Bénichou et le Breton 1987) sur les données des réseaux européen et RENECOFOR (cf. §A.II.3 – 3.) font apparaître que la moyenne des températures des forêts françaises est 10,2°C. Le premier quartile est à 9,1°C, et le troisième quartile à 11,4°C. Cela implique une variation de carbone de 132,0 t C/ha à 94,4 tC/ha, soit environ 16,3 t C/ha de pertes de carbone par degré au voisinage de 10°C.

Cependant, ces valeurs sont purement théoriques, et ne reflètent pas la réalité : i) l'approximation des températures à une valeur annuelle moyenne est très forte, ii) les simulations sont effectuées toutes choses étant égales par ailleurs, alors que d'autres paramètres comme les précipitations sont fortement corrélées avec la température. L'information importante n'est donc aucunement la valeur absolue mais la forte tendance observée.

Cette analyse permet alors d'affirmer que la température est une variable d'entrée extrêmement sensible et que son acquisition nécessite d'être effectuée avec soin.

II.2 – 3.2. Sensibilité des variations de température

L'analyse du chapitre précédent porte sur la température moyenne. Une autre série de simulations a permis de mettre en évidence un effet de l'amplitude de variation autour de la température moyenne. Dans ce paragraphe, la température suit une sinusoïde au cours de l'année – ce qui est très réaliste en pratique – avec des amplitudes de plus en plus grandes, tout en gardant la même valeur moyenne. Les résultats montrent une diminution nette du stock à l'équilibre lorsque l'amplitude augmente (figure A14).

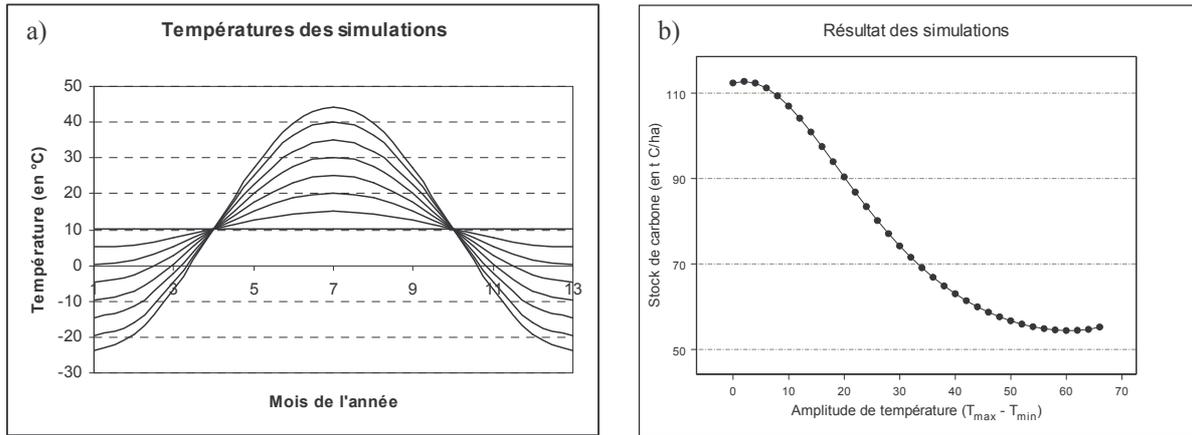


Figure A14 : Températures sinusoïdales comme signal d'entrée (a)
 Résultats des simulations pour les différents signaux de température (b)
 La valeur moyenne des amplitudes pour les forêts françaises est 15,76°C,
 les 1^{er} et 3^{ième} quartile sont de 14,90°C et 16,75°C.

De nouveau, il est possible de procéder à une résolution analytique de ce phénomène.

Pour chacun des compartiments, l'équation différentielle est toujours la même [A3], mais la température n'est plus constante, elle dépend du temps. L'intégration rigoureuse de [A3] n'est plus possible, mais des simplifications permettent de résoudre le problème. La température varie intra-annuellement, mais elle est la même pour toutes les années de la simulation. On peut alors s'attacher à évaluer les pertes/gains de carbone sur une seule année, et estimer l'impact de la température à ce niveau. L'équation [A3] s'intègre alors de la manière suivante :

$$\frac{\Delta C_i}{\Delta t} = \int_{1an} -K_i \cdot f(T(t)) \cdot g(M) \cdot C_i \cdot dt + \int_{1an} A_i \cdot dt$$

où ΔC_i est la (petite) variation de carbone pendant $\Delta t = 1$ an.

Si on ne s'intéresse qu'à une année, alors on peut considérer que la variation de carbone est faible, et qu'alors C_i est constante. On peut alors sortir ce terme de l'intégrale. Si on néglige également les variations intra-annuelles des précipitations, alors on obtient

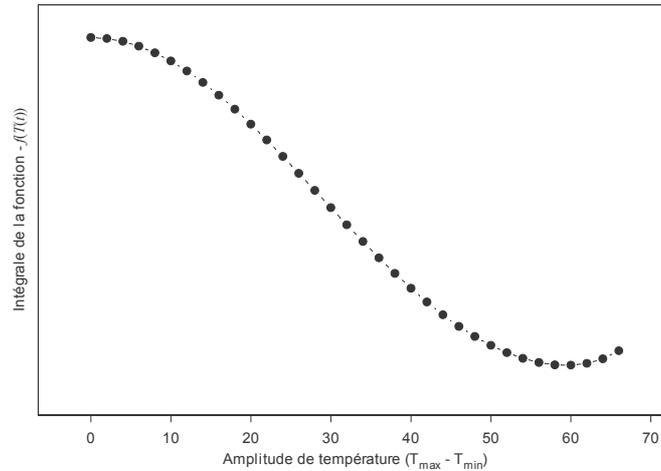
$$\frac{\Delta C_i}{\Delta t} = -K_i \cdot g(M) \cdot C_i \cdot \int_{1an} f(T(t)) \cdot dt + A_{i,annuels}$$

Les températures disponibles étant mensuelles, il est naturel d'approcher l'intégrale de la fonction $f(T(t))$ par une somme de Riemann dont le pas est le mois. On a alors

$$\frac{\Delta C_i}{\Delta t} = -K_i \cdot g(M) \cdot C_i \cdot \frac{1}{12} \cdot \sum_{mois=janvier}^{décembre} f(T(t_{mois})) + A_{i,annuels} \quad [A8]$$

Lorsqu'on assimile la température à une sinusoïde d'amplitude variable, alors on peut calculer cette somme. Les résultats sont présentés figure A15.

De nouveau, les valeurs absolues ne sont pas comparables car il s'agit du facteur et non de la somme de carbone de tous les compartiments à l'équilibre, et car le calcul est effectué pour seulement une année. On peut en revanche noter l'excellente adéquation de la forme de la courbe avec les résultats des simulations (cf. figure A14), ce qui valide les hypothèses simplificatrices employées pour le calcul.



*Figure A15 : Impact théorique de l'amplitude de variation de température
Les valeurs de l'intégrale ne sont pas comparables à des stocks de carbone
en revanche, la forme de la courbe valide nos hypothèses*

Ce résultat, bien que très qualitatif, permet d'une part de confirmer la sensibilité de la température dans le modèle *Century*, mais également de tirer un enseignement majeur : le rôle primordial des températures maximales.

En effet, la somme sur l'année de la fonction $f(T(t))$ se décompose en 12 termes mensuels tous positifs. Or la figure A12 illustre que lorsque les températures sont faibles, ce terme mensuel l'est également, et donc contribue peu à la somme de la fonction. En revanche, les températures élevées vont engendrer un terme mensuel plus grand qui aura plus de poids dans la somme de la fonction. Pour illustrer ce propos, avec les températures utilisées comme conditions moyennes de tous les peuplements, les mois de juin, juillet et août représentent 50,0 % de la somme de cette fonction, alors que les mois de décembre, janvier et février ne représentent que 6,2 %. Finalement, une augmentation des températures élevées fait augmenter cette somme, alors qu'une diminution des températures basses ne la modifie pas.

L'analyse de sensibilité montre alors que les températures maximales doivent être un meilleur indicateur pour le stock de carbone que la température moyenne.

II.2 – 4. Effet de la pluviométrie

Deux termes relatifs aux flux d'eau sont requis en entrée du modèle *Century*, les précipitations mensuelles (*PPT*) et l'évapotranspiration potentielle (*ETP*). Chacune de ces deux variables est sensible pour le stock de carbone final. Leur rapport (PPT / ETP) intervient dans l'équation [A3]. La fonction $g(M)$ vaut :

$$g\left(\frac{PPT}{ETP}\right) = \frac{1}{1 + 30 \times \exp\left(-8,5 \cdot \frac{PPT}{ETP}\right)} \quad [A9]$$

dont le graphe représentatif est montré figure A16.

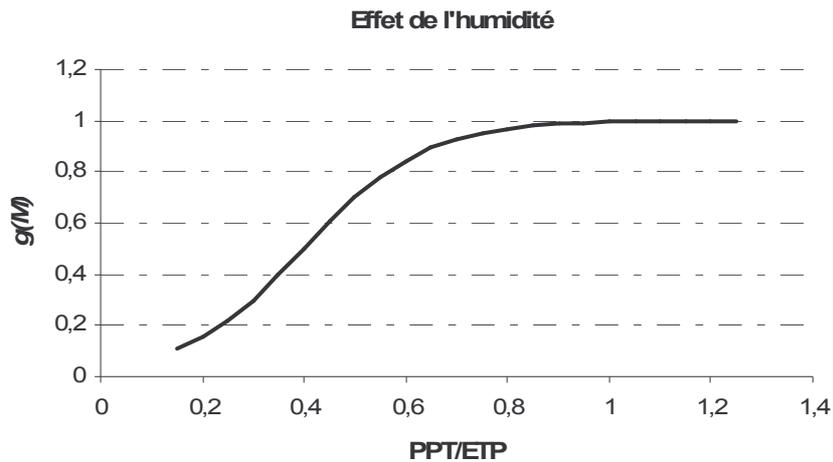


Figure A16 : Effet du rapport PPT / ETP sur la décomposition du carbone.

La comparaison des figures A12 et A16, représentant respectivement l'impact de la température et de la pluviométrie fait ressortir la similitude entre les deux effets (dans la mesure où l'on reste en dessous de 35°C et que l'on n'aborde pas la descente du facteur température). Le principe est alors le même : l'effet de la pluviométrie intervient sous la forme de l'intégrale de la fonction $g(PPT / ETP)$ sur l'année, ce que l'on peut approximer en la somme des douze termes mensuels.

Cependant, l'évapotranspiration est généralement bien plus faible que les précipitations (figure A17), et le rapport PPT / ETP très élevé, ce qui implique que l'humidité est peu limitante pour la plus large partie de l'année. Dans le cas de l'intégrale de la fonction de la température, tous les termes sont proches de zéro, excepté ceux de l'été qui font augmenter la valeur de l'intégrale. Au contraire, dans le cas de la pluviométrie, tous les termes sont élevés, excepté ceux de l'été qui font baisser la somme. De nouveau, les valeurs d'été seront les plus pertinentes pour expliquer les stocks de carbone à l'équilibre. Toutefois, ce facteur permet en réalité seulement de prendre en compte l'inhibition engendrée par les sécheresses estivales (Edmonds 1980), mais ne rend pas compte d'un effet global des pluviométries.

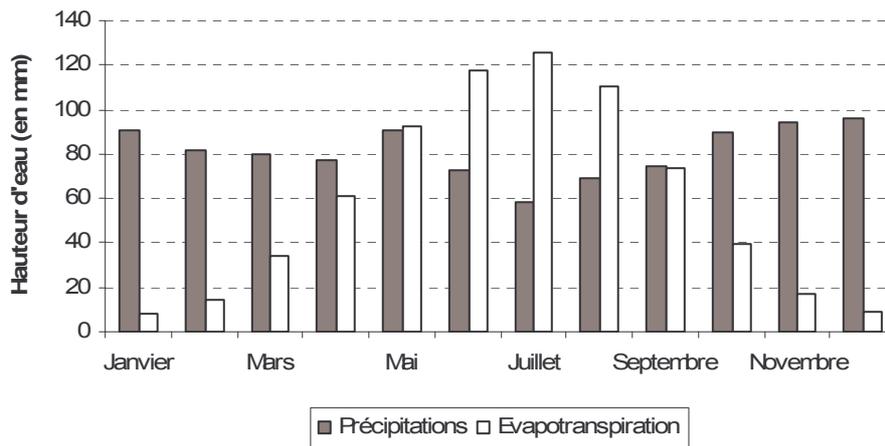


Figure A17 : Comparaison des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle les valeurs sont celles des conditions moyennes (cf. §A.II.2 – 1.)

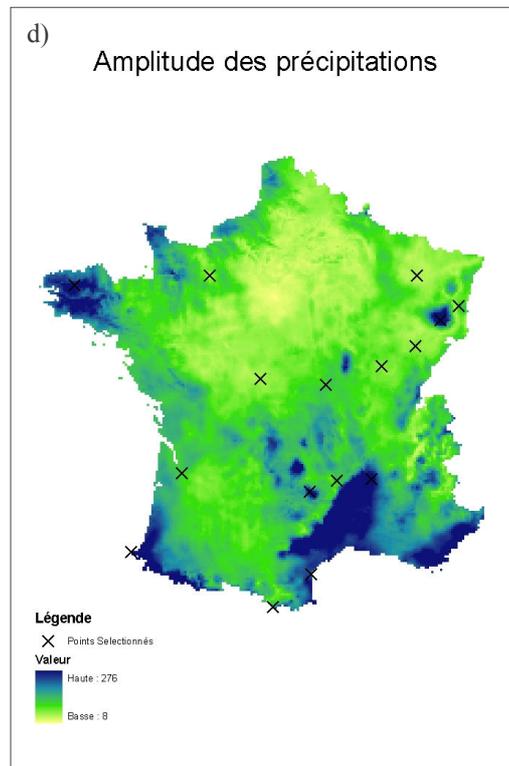
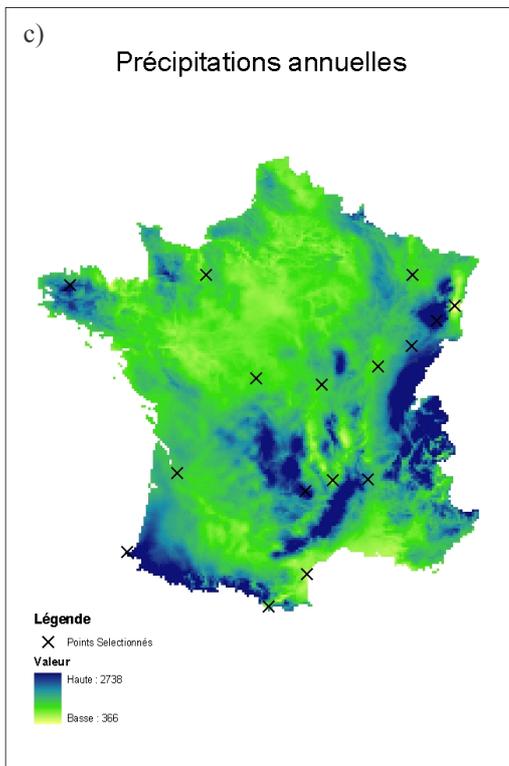
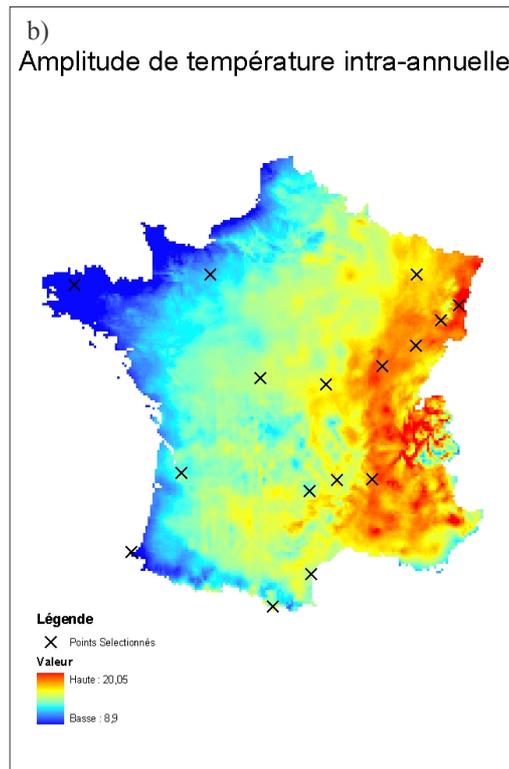
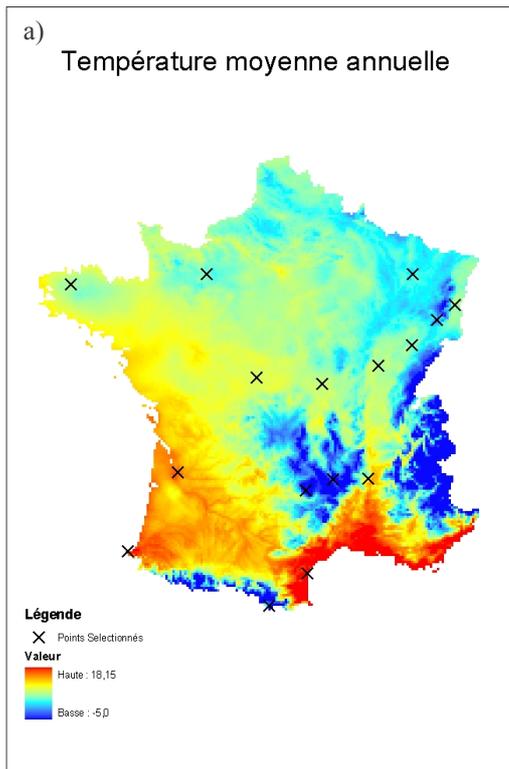


Figure A18 : Sélection des « bornes climatiques » à l'aide du modèle Aurelhy de Météo France selon (a) les températures moyennes, (b) les amplitudes de température, (c) les précipitations annuelles, (d) les amplitudes de précipitation extrémales

II.2 – 5. Effet de climats réalistes

Les températures ainsi que les deux variables liées à l'humidité (précipitations et évapotranspiration) sont très sensibles sur le stock de carbone atteint après obtention d'un régime permanent. Or elles sont fortement corrélées. En effet, l'évapotranspiration augmente en même temps que la température. De plus, en général, les régions où les températures sont les plus élevées sont aussi celles où les précipitations sont les plus faibles (climats du sud, à l'opposé des climats montagnards).

Les analyses de sensibilité portant sur les températures et sur la pluviométrie ont été effectuées indépendamment. Il est donc nécessaire d'envisager des climats réalistes afin d'appréhender l'effet combiné de ces variables.

Toutes choses étant égales par ailleurs, des climats les plus contrastés possibles ont été choisis à l'aide d'un Système d'Informations Géographique (SIG) comportant les données de Météo France (Bénichou et le Breton 1987). Seize climats ont été choisis pour fixer des « bornes climatiques ». Ce sont les climats les plus extrêmes en France du point de vue des températures et des précipitations (valeurs minimales et maximales, amplitudes minimales et maximales). Quelques points intermédiaires ont également été ajoutés. Ces points sont indiqués sur les cartes de la figure A18. Des simulations où seuls les climats varient ont alors été exécutées. Les résultats font apparaître une dépendance forte du climat, et en particulier des températures moyennes (figure A19).

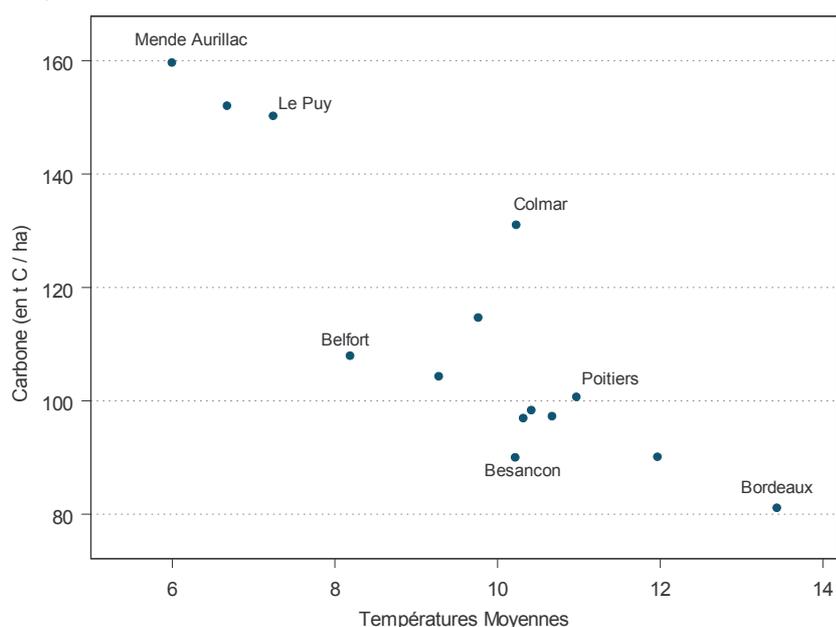


Figure A19 : Relation entre les températures moyennes et le stock de carbone
les résultats sont issus de simulations, avec seul le climat variant
toutes les autres valeurs sont égales aux conditions moyennes

La gamme de variation du carbone du sol peut varier d'environ 80 tonnes de carbone par hectare à Bordeaux, où le climat se caractérise par des températures élevées et des précipitations moyennes, à 160 tonnes de carbone à l'hectare dans un secteur entre Mende et Aurillac où les températures sont très fraîches et la pluviométrie forte. Le stock de carbone peut donc varier du simple au double uniquement sous l'effet du climat dans la gamme des variations françaises.

Les lieux ayant été choisis pour contenir les valeurs climatiques extrêmes, cette gamme de variation, c'est-à-dire un coefficient 2 sur le stock de carbone, devrait être maximale. Il faut

cependant rappeler que les autres variables, comme l'essence du peuplement ou le type de sol, sont toutes identiques pour ces simulations, alors qu'il peut y avoir de nouveau des corrélations avec le climat.

II.2 – 6. Rapport « Lignine / Azote »

Dans le modèle *Century*, la plante de couverture n'est pas renseignée explicitement. En revanche, les apports de carbone sont caractérisés par leur quantité et leur qualité, ce qui donne un effet indirect du peuplement. L'indicateur de la qualité des chutes de matière est le rapport « Lignine / Azote » (L/N) de la matière entrant. De nombreux auteurs emploient cet indicateur dans les études de décomposition de la matière organique (Aber et Melillo 1982, Melillo *et al.* 1982, Edmonds 1987, Taylor *et al.* 1989, Aber *et al.* 1990, Girisha *et al.* 2003).

Les simulations exécutées en ne faisant varier que ce paramètre montrent qu'il est sensible. Le stock de carbone croît linéairement avec le rapport L/N avec une pente de 0,5 t C / ha lorsqu'on utilise les conditions moyennes pour les autres paramètres et variables d'entrée. Les points issus de ces simulations sont strictement alignés, ce qui a incité à résoudre de manière analytique ce problème.

Dans le modèle *Century*, le rapport L/N n'intervient que lors de la répartition des apports de carbone entre les compartiments intermédiaires dits « Structurels » et « Métaboliques » (cf. figure A9 du paragraphe A.II.1 – 2.). Le principe est rigoureusement identique entre les apports aériens et souterrains. La loi de répartition entre ces compartiments est linéaire : le compartiment « Métabolique » reçoit la fraction F_M , et le compartiment « Structurel » reçoit la fraction $F_S = 1 - F_M$. Or cette fraction dépend de L/N suivant le modèle

$$F_M = 0,85 - 0,018 \times \frac{L}{N} \quad [A10]$$

Et comme nous l'avons montré dans le paragraphe A.II.2 – 2., moyennant quelques approximations, le stock de carbone à l'équilibre relatif à un compartiment est donné par l'équation [A6] rappelée ici

$$C_i(\infty) = \frac{A_i}{K_i \times f(T) \times g(M)} \quad [A6]$$

L'équation [A10] implique donc une différence des valeurs des apports A_i de l'équation [A6] en fonction du rapport L/N . Or les constantes de décomposition des compartiments « Métaboliques » et « Structurels » sont différentes, ce qui implique un stockage final différent.

De plus, à l'équilibre, les flux entrant dans un compartiment et les flux sortants sont identiques. Une fraction du flux sortant est dégagée sous forme de CO_2 vers l'atmosphère, et le reste est réparti dans les compartiments « Actif » ou « Lent » dans le cas du compartiment « Structurel », et « Actif » seulement pour le compartiment « Métabolique ». Donc une différence de répartition des apports entre les compartiments « Métabolique » et « Structurel » implique de même une différence des apports dans les compartiments « Actif » et « Lent ». Toutes ces dépendances étant linéaires avec le rapport L/N (puisque l'équation [A10] est linéaire), le stock global de carbone à l'équilibre varie également linéairement avec ce facteur.

La complexité des flux entre les sept compartiments du modèle ne permet pas de résoudre l'ensemble du problème de manière analytique, mais seulement de justifier la dépendance linéaire du stock de carbone final au rapport L/N . En revanche, l'analyse de sensibilité permet d'intégrer tous ces flux et de donner l'importance de cette variable (+0,5 t C / ha par unité de L/N).

Les valeurs retenues à partir d'une analyse bibliographique pour cette variable (cf. paragraphe A.II.3 – 4.) sont assez groupées. Elles varient d'environ 30 pour le Chêne sessile à 35 pour le Hêtre. Le Pin laricio est à la marge avec une valeur de 52,5. Il est alors raisonnable de s'attendre à une variation assez faible du stock de carbone avec cette variable.

II.2 – 7. Apports de matière

Le carbone arrive dans le sol au niveau aérien par les chutes de litière (feuilles, branches et rameaux, fruits, écailles de bourgeons etc.), et au niveau souterrain par les apports racinaires (décomposition des grosses racines et turnover racinaire). Il est possible d'effectuer des mesures pour connaître les apports aériens, par exemple en plaçant des bacs à litière relevés périodiquement. On peut ainsi connaître de façon assez précise à la fois les quantités de carbone apportées au sol par chutes de litière, ainsi que leur répartition intra-annuelle. Pour les apports racinaires, le problème est beaucoup plus délicat et les mesures extrêmement lourdes à effectuer.

Une analyse de l'impact de ces chutes de litière est indispensable. Les aspects quantité et répartition intra-annuelle ont tous les deux été abordés.

Afin de simplifier le problème, dans ces analyses, les apports racinaires ont été considérés proportionnels aux apports aériens. Cette hypothèse est assez couramment utilisée (Brouwer 1962, Reynolds et Thornley 1982, cités dans Bartelink 1998), de même, pour le Pin sylvestre, la biomasse des racines fines est égale à 50% de celle des aiguilles (Vanninen et Mäkelä 1999, cité dans Peltoniemi 2004), alors que pour l'Epicéa commun, elle est de 27 % (Cronan 2003 ; Helmisaari et Hallbäcken 2003, cités dans Peltoniemi 2004).

II.2 – 7.1. Aspects quantitatifs

Dans un premier temps, l'aspect quantitatif a été étudié. L'analyse fait ressortir un résultat très simple : le stock de carbone final est proportionnel aux apports de carbone.

L'équation différentielle régissant la décomposition du carbone au sein de chaque compartiment a été intégrée dans le paragraphe A.II.2 – 2. Le même calcul permet de justifier théoriquement la stricte proportionnalité entre les apports annuels de carbone et le stock final à l'équilibre. En effet, l'équation [A6] montre que le stock final d'un compartiment est proportionnel à son carbone entrant, et les quantités de carbone entrant dans un compartiment sont des fractions des chutes de litière, d'où le résultat.

II.2 – 7.2. Répartition intra-annuelle

Les quantités de carbone arrivant au sol peuvent avoir des répartitions intra-annuelles fortement différentes suivant les essences. En particulier la majorité des feuillus perdent leurs feuilles à l'automne, on peut donc imaginer un pic d'apport de carbone à cette période. En revanche, pour des essences résineuses par exemple, les aiguilles restent en place plusieurs années, et les chutes peuvent être plus réparties sur l'ensemble de l'année. La répartition intra-annuelle des apports de matière a-t-elle un impact sur le stock de carbone à l'équilibre ?

Pour tester cet effet, plusieurs simulations ont été exécutées avec des quantités de carbone apportées identiques sur l'année, mais avec des répartitions intra-annuelles différentes. Elles suivent une loi normale, centrée sur la semaine 26 (milieu de l'année), avec un pic de hauteur contrôlé, mais avec une somme annuelle constante.

Les résultats sont extrêmement intéressants puisqu'ils ne montrent aucune différence entre ces simulations (figure A20). Les stocks présentés sont les moyennes annuelles par compartiment. Par contre, les valeurs des stocks de chaque compartiment présentent des variations intra-annuelles différentes.

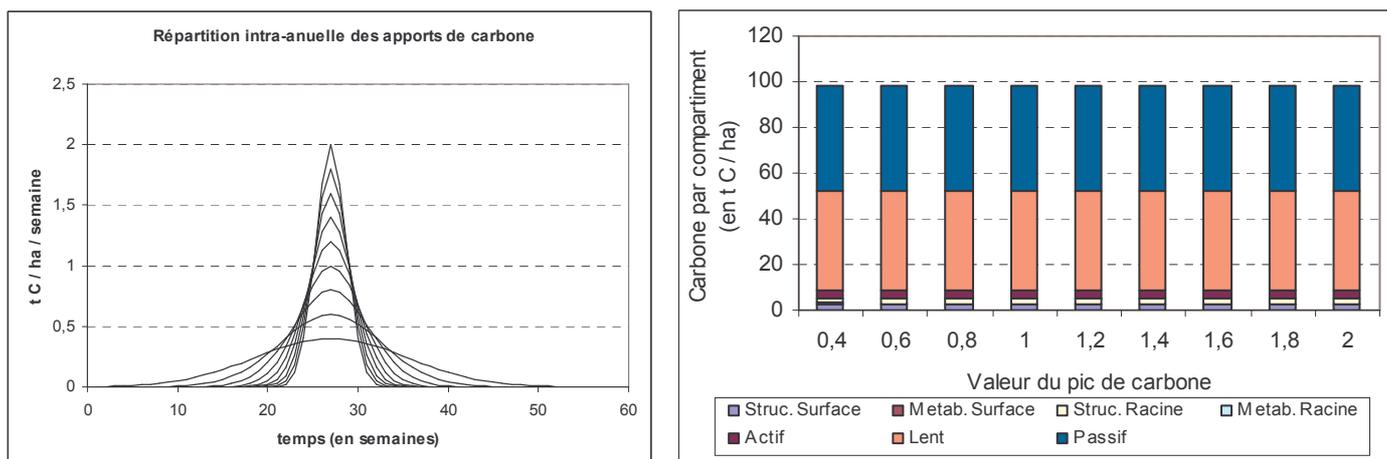


Figure A20 : a) répartition intra-annuelle des apports de carbone hebdomadaire
b) effet sur le stock de carbone à l'équilibre – les résultats sont montrés par compartiment

La très forte similarité entre les résultats de ces simulations a conduit à tester des répartitions extrêmes pour les apports de carbone. La figure A21 montre la juxtaposition de deux simulations : la première correspond à un apport de carbone de type Dirac, i.e. l'ensemble du carbone de l'année arrive au même moment, alors que la deuxième simulation présente des apports uniformément répartis sur l'ensemble de l'année. Cette figure illustre bien la très faible différence sur le stockage annuel moyen de carbone dans les différents compartiments du sol.

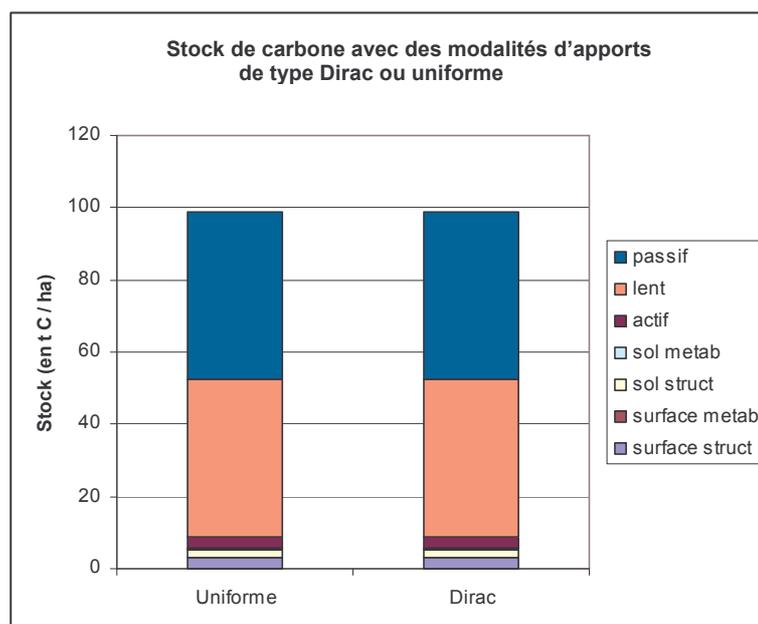


Figure A21 : Stocks de carbone annuels moyens à l'équilibre
lorsque les apports sont de type Dirac (en semaine 26) ou uniforme sur l'année

De plus, ces résultats résistent à des modifications du climat : ils restent les mêmes lorsque l'on déphase la température ou le rapport des précipitations sur les ETP.

En revanche, les variations intra-annuelles, comme dans les simulations précédentes, ne sont pas identiques. Elles sont présentées figure A22 pour les 4 compartiments « Structurel » et « Métabolique » de surface, « actif » et « lent ». Les variations des compartiments intermédiaires

racinaires sont identiques à ceux de surface, et le compartiment « passif » est très similaire au « lent » mais avec une amplitude moindre.

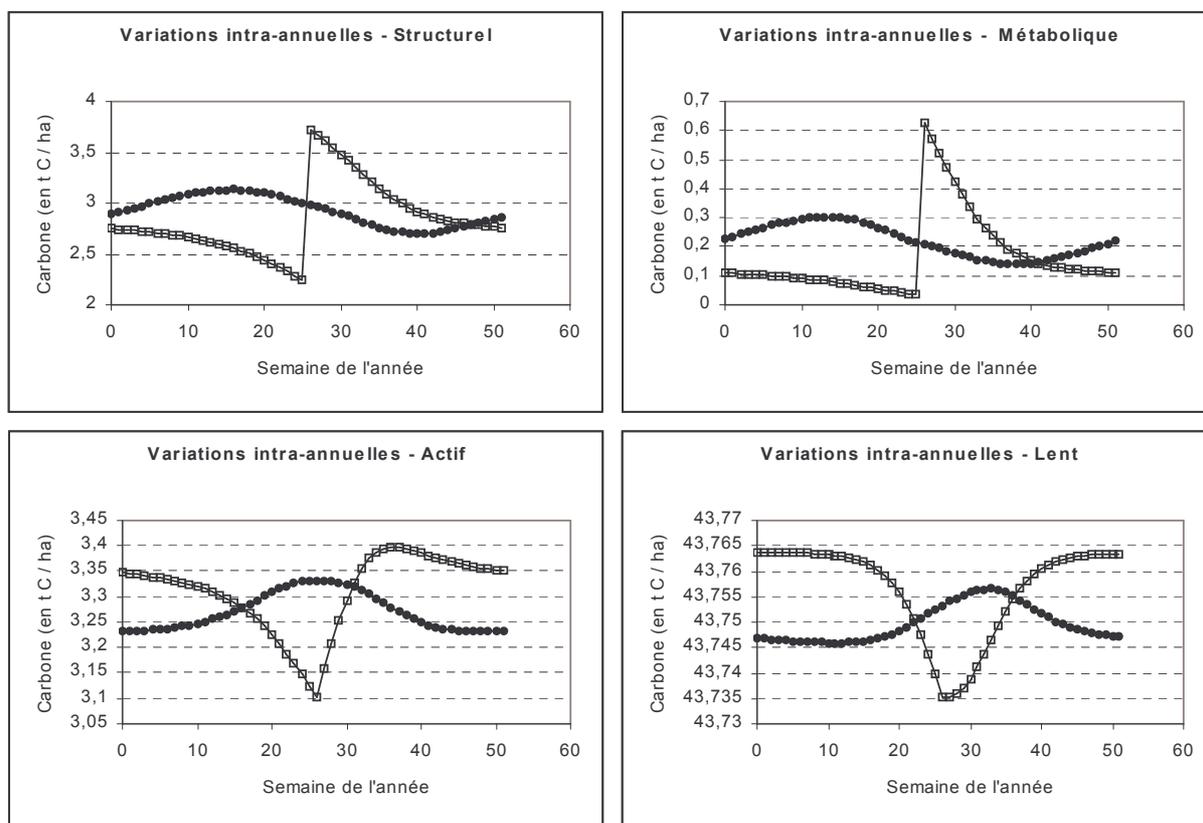


Figure A22 : Variations intra-annuelles des stocks de carbone pour les compartiments « Structurel », « Métabolique », « Actif » et « Lent ». Les apports de carbone sont sous forme de Dirac (carrés ouverts) ou uniformes (ronds pleins)

Dans le cas du Dirac, l'apport de carbone à la semaine 26 provoque une augmentation ponctuelle très importante des compartiments « Structurel » et « Métabolique » de surface. On observe ensuite une diminution continue de la quantité de carbone, jusqu'à atteindre une valeur d'équilibre.

Avec une répartition uniforme des apports de carbone, ces deux compartiments suivent les variations de la température. Si l'on s'intéresse à la pente de la courbe, on remarque qu'elle est la plus faible à la semaine 26, ce qui correspond à la température maximale, donc probablement à la plus grande capacité de décomposition du carbone. A l'opposé, la pente la plus forte est pour la semaine 52, où l'on suppose que l'effet est inverse.

Les compartiments « Actif » et « Lent » ont aussi une rupture de pente après l'occurrence du Dirac, ce qui est attendu, puisque les apports qu'ils subissent sont issus des compartiments « Structurel » et « Métabolique » qui augmentent brutalement. Dans le cas de la répartition uniforme, l'augmentation d'« Actif » et « Lent » avec la température résulte d'apports plus importants dus à la décomposition accélérée de « Structurel » et « Métabolique », alors que leur propre décomposition reste moindre.

Dans ces simulations, le Dirac est placé en semaine 26, ce qui correspond au maximum de la courbe de températures. Afin d'éviter tout artéfact lié à la date du Dirac, d'autres simulations ont été exécutées en faisant varier sa semaine d'occurrence. Le stock de carbone à l'équilibre n'est pas exactement le même, mais ses variations sont parfaitement négligeables.

En conclusion de cette partie de l'analyse de sensibilité, la répartition intra-annuelle du carbone dans le modèle *Century* n'a pas d'importance. Il sera donc nécessaire de bien évaluer les quantités apportées, puisque le stock final de carbone est proportionnel aux apports annuels (cf. paragraphe A.II.2 – 7.1), mais en revanche, il ne sera pas utile de renseigner la forme intra-annuelle des apports. Elle sera prise selon une répartition uniforme.

II.2 – 8. Effet de la texture du sol

Le dernier point de l'analyse de sensibilité concerne la texture du sol, traduite dans le modèle par la fraction de limons plus argiles de la terre fine.

Dans tout le cheminement du carbone dans le modèle *Century*, le seul endroit où intervient cette variable est la quantité de CO₂ dégagée lors d'un pas de la décomposition du compartiment « Actif ». Cette perte de carbone se fait au détriment du compartiment « Lent » suivant une loi linéaire décroissante avec la fraction de limons plus argiles. Si le dégazage en CO₂ est décroissant avec l'augmentation cette fraction, alors on s'attend à un stockage supérieur de manière linéaire.

L'analyse de sensibilité montre une dépendance presque linéaire forte. Le stock de carbone passe de 50,5 t C / ha pour 12 % de limons plus argiles (soit 88 % de sable) à 144,2 t C / ha pour 92 % (soit 8 % de sable).

II.3 – Description des données

Le modèle *Century* est un modèle dynamique, c'est-à-dire qu'il décrit des processus dépendant du temps. Le valider dans son ensemble nécessiterait alors un grand nombre de données, et en particulier comportant des informations dynamiques. Des données précises sont extrêmement difficiles à obtenir sur les sols, et la lourdeur de leur acquisition les ont rendues rares.

Ainsi, les seules données sur le carbone du sol disponibles pour la présente étude sont les données du réseau européen (Vanmechelen *et al.* 1997, Badeau 1998) et du réseau RENECOFOR (Brêthes et Ulrich 1997, Ponette *et al.* 1997). Ces données sont des observations uniques, et – jusqu'à présent – sans suivi à des dates différentes (au moins pour les valeurs de carbone du sol).

En conséquence, ces données ne permettront ni de recalibrer *Century* pour les forêts françaises, ni de valider de façon sûre les paramètres tels qu'ils sont définis par Parton (1987). En revanche, elles permettront de vérifier si le comportement des stocks prédit par *Century* est cohérent avec les données disponibles. Par exemple, est-ce que les impacts climatiques observés avec l'analyse de sensibilité présentent les mêmes tendances que les observations réelles des stocks de carbone : les stations situées dans des climats plus chauds présentent-ils des stocks de carbone inférieurs ?

Cette partie du chapitre décrit les données disponibles dans chacun de ces réseaux, sans en faire l'analyse. Celle-ci interviendra ultérieurement. Les données climatiques ainsi que le rapport « Lignine / Azote » issu de la bibliographie sont également exposés.

Ces données ont été fournies grâce à la sympathique coopération de Vincent BADEAU pour le réseau européen, de Marc LANIER et Erwin ULRICH pour le réseau RENECOFOR, et de Christian PIEDALLU pour les données climatiques.

II.3 – 1. Réseau européen

Le réseau européen relève d'un programme de surveillance de l'état des peuplements forestiers (Badeau 1998), et regroupe une trentaine de pays autour de la protection des forêts contre la pollution atmosphérique. Le rapport final pour l'ensemble de ces pays a été publié en 1997 (Vanmechelen *et al.* 1997).

Ces placettes, dites de *niveau I*, sont installées sur un réseau systématique à maille carrée de 16 km de côté. Cela a permis de rassembler sur le territoire français une base de 593 points d'observation potentiellement exploitables pour la présente étude.

Les mesures de ces placettes sont très complètes, de nombreuses données de divers types y sont relevées.

En particulier, outre les renseignements généraux, les mesures intéressantes pour l'étude sont celles permettant de calculer les stocks de carbone, c'est-à-dire :

- pour les couches organiques :
 - la masse de litière prélevée dans des cadres standards,
 - le taux de carbone de la litière prélevée,
- pour les couches minérales :
 - la densité apparente, qui correspond à la masse de terre fine d'un volume d'échantillon divisé par le volume total de l'échantillon y compris les cailloux,
 - le taux de carbone dans la terre fine
 - la profondeur du sol (si cette donnée est peu fiable pour les sols profonds, elle n'est pas très importante dans ces cas puisque le carbone se trouve très majoritairement en surface)

Ces données permettent de calculer le taux de carbone à l'hectare des sols. Pour les couches minérales, ces valeurs sont fournies pour les profondeurs 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, et 40-60 cm. Certaines données sont parfois manquantes soit car la roche mère est moins profonde que 60 cm, soit pour d'autres raisons auquel cas le point est malheureusement écarté.

Les stocks de carbone des couches minérales ont pu être recalculés pour 463 points.

D'autre part, parmi les nombreuses autres variables, plusieurs sont pertinentes pour tenter d'expliquer les quantités de carbone observées :

- des données géographiques
 - les coordonnées Lambert II étendues X et Y,
 - l'altitude,
- des données pédologiques
 - la description des horizons,
 - le type de sol,
 - la texture du sol, sous la forme de la position dans le triangle de Jamagne pour chacun des horizons. Dans le cadre de la thèse, cette variable a servi à donner des taux de sable, limons et argiles en prenant le barycentre de chaque horizon en deçà de 60 cm pondéré par son épaisseur,
 - le pH CaCl₂, recalculé pour avoir la moyenne sur la profondeur du profil (jusqu'à 60 cm),
 - le taux de cailloux,
 - la profondeur prospectable,

- le relevé de présence de traces humaines (présence de traces de labours récents, labours anciens, fossés de drainages, crochetage...)
- des données sur la végétation de couverture
 - relevé floristique avec les coefficients d'abondance / dominance, y compris pour la strate arborescente, qui a permis d'estimer l'essence principale du peuplement.

S'agissant d'un réseau systématique, les peuplements forestiers peuvent être de toute nature, aussi bien de futaie que de TSF ou de taillis simple. Le rapport des cahiers du DSF consacré à la description de ces données est très détaillé (Badeau 1998) et présente entre autres les histogrammes pour la majorité des variables. L'histogramme des stocks de carbone est illustré figure A23, et les valeurs moyennes, minimales et maximales des variables figurent dans le tableau A6.

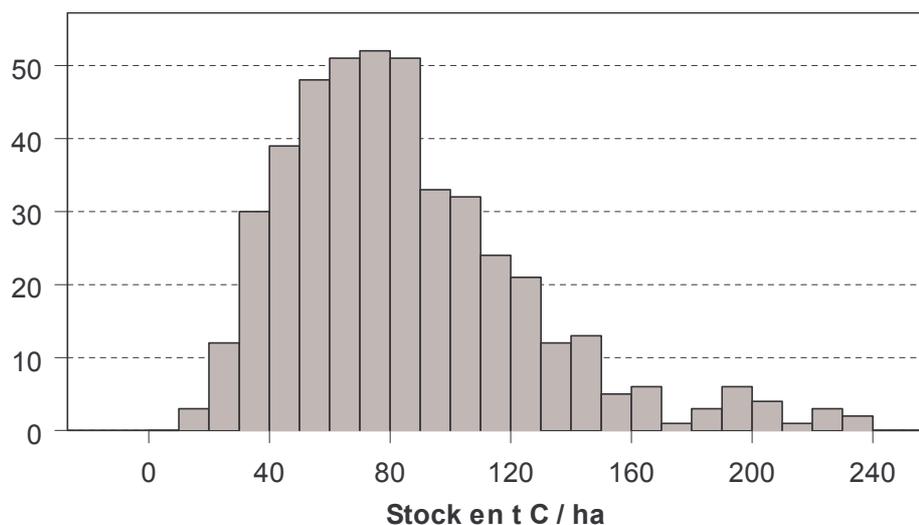


Figure A23: Histogramme des stocks de carbone du réseau européen jusqu'à 60 cm de profondeur

II.3 – 2. Réseau RENECOFOR

Le réseau RENECOFOR (REseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers¹) regroupe les placettes dites de *niveau II*. Il s'agit d'un réseau d'observation intensif, dont l'objectif vise à déterminer les facteurs clefs du fonctionnement de différents types d'écosystèmes.

Contrairement au réseau européen, les positions des placettes ne sont pas systématiques, mais ont été choisies pour représenter au mieux les différents types d'écosystèmes étudiés (Ulrich 1995). En particulier, l'essence principale du peuplement est contrôlée, ainsi que la structure forestière. La grande majorité sont des futaies régulières. Le réseau RENECOFOR compte 102 placettes en France.

Les mesures effectuées sur les points du réseau RENECOFOR intéressantes pour les besoins de la thèse sont les mêmes que celles du réseau européen (cf paragraphe A.II.3 – 1.) avec en outre la structure et l'âge du peuplement (dans le cas des futaies régulières).

¹ Réseau RENECOFOR : Office National des Forêts, centre de coordination à Fontainebleau

	Altitude	Température moyenne	Précipitations annuelles	ETP annuelle	pH (CaCl ₂)	% limons + argiles	Effectif par essence
<i>Réseau RENECOFOR</i>	<i>min</i>	4,5	608	502	3,11	12,7	Chênes sess. et péd. : 30 Pins (tous sauf mar.) : 23 Hêtre : 20 Epicéa : 11 Sapin : 11 Douglas : 6
	<i>moy</i>	9,6	1 011	675	4,4	57,8	
	<i>max</i>	13,4	2 068	890	7,9	92,5	
<i>Réseau européen</i>	<i>min</i>	4,0	525	441	3,3	12,7	Autres : 199 Chênes sess. et péd. : 141 Hêtre : 63
	<i>moy</i>	10,3	965	708	5,3	59,9	Pins (tous sauf mar.) : 61 Pin maritime : 50 Epicéa : 30 Sapin : 30 Douglas : 15
	<i>max</i>	15,9	2 000	1 012	7,8	92,5	

Tableau A6 : valeurs minimales, moyennes et maximales de variables des réseaux européen et RENECOFOR

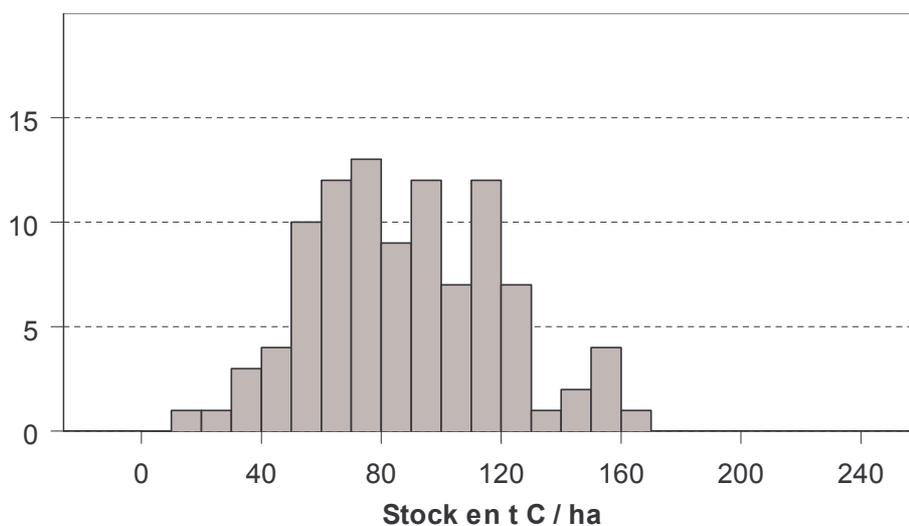


Figure A24 : Histogramme des stocks de carbone du réseau RENECOFOR jusqu'à 60 cm de profondeur

Les mesures pédologiques n'ont pas été effectuées sur un seul point dans la placette, comme dans le cas du réseau européen, mais sur 5 grappes différentes espacées d'environ 8 mètres (Ponette *et al.* 1997). Au sein de chaque grappe, 5 prélèvements sont effectués, et mélangés intimement avant l'analyse. Dans la présente étude, la valeur retenue est la moyenne de stock des cinq grappes. L'historgramme des stocks de carbone est présenté figure A24.

Chutes de litière :

Par ailleurs, d'importantes données de chutes de litière sont mesurées sur les placettes du réseau RENECOFOR.

Par placette, 10 bacs de 0,5 m² sont installés et les litières relevées entre 3 à 5 fois par an. La récolte est ensuite triée en feuilles de l'essence, branches ou fruits de l'essence principale puis une dernière catégorie contenant tout le reste.

Ces relevés sont effectués depuis environ une décennie. L'historgramme des durées de prélèvement est montré figure A25.

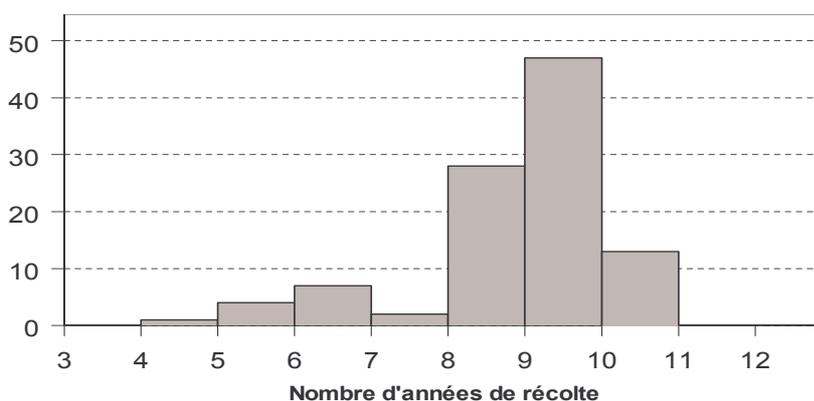


Figure A25 : Histogramme des nombres d'années de récolte des chutes de litière des placettes du réseau RENECOFOR au moment de l'étude

Outre les masses sèches, de nombreuses mesures de concentration de carbone sont effectuées sur ces relevés pour chacun des compartiments décrits plus haut, ce qui permet d'estimer assez précisément les apports de carbone que le sol reçoit.

II.3 – 3. Données climatiques

Grâce au travail de Christian PIEDALLU à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) contenant les données de Météo France, et connaissant les coordonnées Lambert II étendues de chacune des placettes des réseaux européen et RENECOFOR, il a été possible de recalculer les moyennes mensuelles de température, de précipitations et d'évapotranspiration correspondant à chaque placette. Ces informations sont basées sur les moyennes trentennales de Météo France (période 1961 – 1990). Le modèle utilisé est *Aurelhy* (Bénichou et le Breton 1987).

Il est ainsi possible de mettre en relation les mesures de stocks de carbone avec des facteurs climatiques sur les données des deux réseaux.

II.3 – 4. Rapport « Lignine / Azote »

Comme le montre l'analyse de sensibilité, le rapport lignine sur azote est sensible pour le stock de carbone. Un soin particulier a été pris pour sélectionner dans la bibliographie des articles pour lesquels les valeurs de ce ratio sont indiquées.

Dans un premier temps, l'analyse bibliographique a été menée pour estimer s'il est possible de grouper les essences forestières par catégorie, comme par exemple « les feuillus » ou « les résineux ». Cette démarche n'a pas porté de fruits, il n'est pas possible d'effectuer cette simplification. Néanmoins, devant le manque d'information sur ce point, les articles sur le Chêne pédonculé ont été associés à ceux sur le Chêne sessile.

Le tableau A7 regroupe les valeurs du rapport lignine sur azote pour les quatre essences étudiées dans la thèse – Chêne (sessile et pédonculé), Hêtre, Pin laricio et Douglas – dans les diverses sources bibliographiques.

<i>Essence</i>	<i>Valeur</i>	<i>Compartiment</i>	<i>Source</i>
<i>Chêne pédonculé</i>	23,6	Feuilles de litière (feuilles d'ombre)	(Sariyildiz et Anderson 2003)
<i>Chêne pédonculé</i>	32,4	Feuilles de litière (feuilles de lumière)	(Sariyildiz et Anderson 2003)
<i>Chêne sessile</i>	32,9	Feuilles de litière	(Cortez <i>et al.</i> 1996)
<i>Douglas</i>	33,6	Aiguilles de litière	(Taylor <i>et al.</i> 1989)
<i>Douglas</i>	26,8	Aiguilles de litière	(Koopmans <i>et al.</i> 1998)
<i>Douglas</i>	25,7	Aiguilles de litière	(Koopmans <i>et al.</i> 1998)
<i>Douglas</i>	26,2	Aiguilles de litière	(Thomas et Prescott 2000)
<i>Douglas</i>	43,4	Aiguilles de litière	(Prescott et Preston 1994)
<i>Hêtre</i>	43,8	Feuilles de litière	(Cortez <i>et al.</i> 1996)
<i>Hêtre</i>	37,6	Feuilles de litière	(Hättenschwiler et Bretscher 2001)
<i>Hêtre</i>	30,8	Feuilles de litière	(Hättenschwiler et Bretscher 2001)
<i>Hêtre</i>	39,3	Feuilles de litière	(Hättenschwiler et Bretscher 2001)
<i>Hêtre</i>	39,1	Feuilles de litière	(Hättenschwiler et Bretscher 2001)
<i>Hêtre</i>	28,6	Feuilles de litière	(Hättenschwiler et Bretscher 2001)

<i>Hêtre</i>	27,8	Feuilles de litière	(Hättenschwiler et Bretscher 2001)
<i>Hêtre</i>	37,6	Feuilles de litière	(Hättenschwiler et Bretscher 2001)
<i>Hêtre</i>	31,1	Feuilles de litière	(Hättenschwiler et Bretscher 2001)
<i>Hêtre</i>	30,1	Feuilles de litière (feuilles d'ombre)	(Sariyildiz et Anderson 2003)
<i>Hêtre</i>	42,3	Feuilles de litière (feuilles de lumière)	(Sariyildiz et Anderson 2003)
<i>Pin laricio</i>	46,3	Aiguilles de litière	(Fioretto <i>et al.</i> 1998)
<i>Pin laricio</i>	58,7	Aiguilles de litière	(de Santo <i>et al.</i> 2002)
<i>Chêne sessile</i>	36,3	Racines	(Le Dantec 2000)
<i>Douglas</i>	22,8	Racines	(Chen <i>et al.</i> 2002)
<i>Hêtre</i>	36,3	Racines	(Le Dantec 2000)
<i>Pin sylvestre</i>	78,0	Racines	(Berg <i>et al.</i> 1998)

Tableau A7 : Valeurs des rapports lignine / azote issus de la bibliographie

Pour le rapport lignine / azote des racines, la bibliographie est bien plus restreinte que pour les feuilles ou aiguilles, voire nulle dans le cas des Pins noirs (d'Autriche ou laricio). A défaut, une valeur du Pin sylvestre est utilisée.

Les valeurs utilisées dans les simulations sont les moyennes arithmétiques par essences des valeurs du tableau A7.

II.4 – Modélisation

Les données décrites dans le chapitre précédent ont permis d'élaborer des modèles. En particulier, dans un premier temps, les données de chutes de litière du réseau RENECOFOR ont servi à évaluer les quantités de carbone apportées au sol en fonction des différentes essences. Ensuite, le regroupement des données des deux réseaux a formé une base de données suffisamment conséquente pour être exploitée pour la construction d'un modèle statique décrivant le carbone du sol.

II.4 – 1. Modèle de chutes de litière

Les données du réseau RENECOFOR sur les chutes de litières sont assez complètes. Elles ont permis d'établir un modèle spécifique pour le Chêne, le Hêtre, le Douglas, les Pins (en groupant les Pins laricio, sylvestre et maritime), l'Epicéa, et le Sapin, précisant également la proportion entre les branches et les feuilles. Deux approches ont été abordées, la première, dite locale, dans laquelle les données de chaque placette sont traitées par courtes périodes afin de mettre en évidence un effet de la maturité du peuplement, et une approche globale, où la production moyenne de chaque placette est calculée afin d'aboutir à un modèle plus robuste.

Les approches sont décrites sur la base des données de chutes de litière des placettes de Chêne et de Hêtre. Les résultats pour les autres essences sont présentés ensuite.

II.4 – 1.1. Approche locale

Les chutes sont collectées dans des bacs à litière, et récoltées quatre fois par an. La variable intéressante est le cumul de ces collectes en fonction du temps. Il en résulte une fonction globalement linéaire comme présentée dans la figure A26, strictement croissante, mais augmentant par sauts correspondant aux saisons. Chaque saut correspond à une chute brutale (à l'automne).

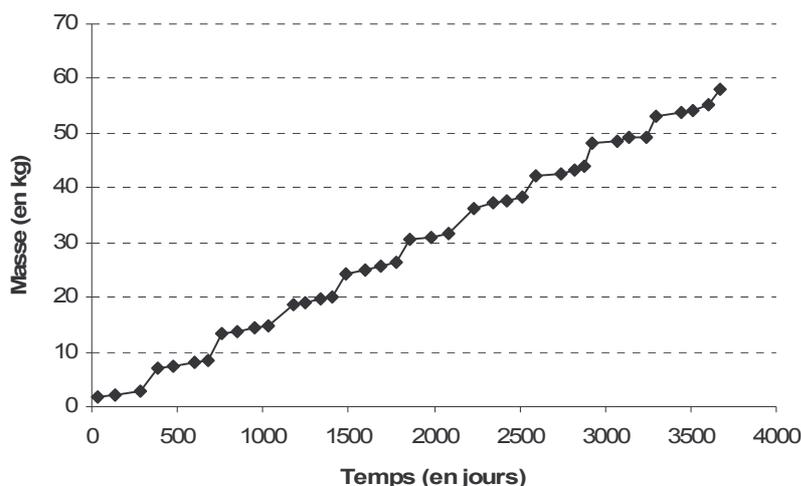


Figure A26 : Exemple : placette CHS 21. Chutes cumulées dans les collecteurs en fonction du temps (surface totale : 10 m²)

Avec le temps, le peuplement a évolué. Les arbres ont poussé entraînant une augmentation de la surface terrière, et des éclaircies ont également pu être pratiquées.

L'hypothèse envisagée est une influence de la maturité du peuplement sur la quantité de chutes de litière. L'effet du couple surface terrière – âge a alors été testé. La méthode employée est la suivante : pour chaque peuplement, la série de chutes de litière est séparée en tronçon de quelques années, correspondant à l'intervalle entre deux mesures dendrométriques du peuplement. La production moyenne de la période est alors estimée suivant une méthode d'interpolation permettant de prendre en compte les effets de bord (par exemple, commencer et terminer la période de mesure par le saut automnal aurait engendré des biais). Par ailleurs, la surface terrière moyenne et l'âge moyen du peuplement sont estimés au moyen des mesures dendrométriques du peuplement.

Les résultats sont peu concluants puisque la surface terrière était significative, mais avec une influence très faible et une variabilité résiduelle très importante, et que l'âge du peuplement en revanche n'a pas d'effet.

Il est en particulier très intéressant de noter qu'on ne remarque pas d'accident de production foliaire lorsque des éclaircies sont pratiquées.

La fertilité du peuplement pouvait *a priori* également avoir un effet sur la production de matière. Elle a alors été recalculée pour chacun des peuplements de la manière suivante : pour une date donnée, avec l'inventaire exhaustif des circonférences les 49 plus gros arbres ont été sélectionnés afin de calculer la circonférence dominante (les peuplements sont de 50 ares). Par ailleurs, la courbe circonférence hauteur a été calibrée pour chacun des peuplements à l'aide de l'échantillon d'arbres dont les hauteurs sont connues. Cela a permis d'estimer la hauteur dominante du peuplement à un âge donné. Ensuite, nous avons utilisé les courbes de croissance de Duplat et Tran-Ha (1997) dans le cas du Chêne et le modèle de Korf, redécouvert par Lunqvist (1957), et recalibré pour le Hêtre afin de se ramener à la hauteur dominante à 100 ans, ce que nous utilisons comme indice de fertilité.

La combinaison de cet indice avec la surface terrière n'a pas donné de résultats plus probants.

Cette approche semble au premier abord assez intéressante, car elle permet, pour un même peuplement, d'avoir plusieurs points d'observation pour plusieurs âges différents, plusieurs surfaces terrières, et même éventuellement des effets avant/après éclaircie. Mais elle engendre beaucoup de variabilité dans des productions de litière car ces dernières sont estimées sur des périodes beaucoup plus courtes.

D'autre part, dans le réseau RENECOFOR, les mesures de chutes de litière ont débuté dans les années 1994-95, et sont disponibles jusqu'en 2003, alors que les données dendrométriques vont généralement de 1991-92 à 2000. La zone de recouvrement est trop faible pour obtenir suffisamment de points d'observation. Une approche globale a fourni des résultats plus robustes.

II.4 – 1.2. Approche globale

Cette méthode ne consiste plus à étudier les variations d'un même peuplement au cours du temps, mais à prendre la productivité moyenne en litière de celui-ci, et à trouver les variables qui expliquent les différences obtenues. Une droite moyenne par chacune des courbes de production de litière cumulée (figure A26) est calculée, et sa pente donne une très bonne estimation de la productivité.

Les variables disponibles sont la fertilité, calculée précédemment (hauteur dominante à 100 ans), la température et les précipitations (moyennes trentennales), et l'altitude.

La fertilité n'influe pas sur la quantité de chutes de litières dans le cas du Chêne. Elle est en revanche significative pour le Hêtre, mais avec un effet assez peu marqué (figure A27).

Les résultats de la littérature sur ce point sont assez divergents (Bréda, *comm. pers.*). Lorsque les études sont menées le long de très grands gradients, comme sur un transect allant du cercle polaire en Scandinavie jusqu'au sud de l'Espagne, des différences de productivité foliaire sont mises en évidence (Berg *et al.* 1999), mais elles ne se retrouvent pas à l'échelle d'un grand massif forestier. Bien qu'il ne reflète pas exactement la production foliaire, le LAI (Leaf Area Index) en donne toutefois une idée, et ne présente pas de différences suivant les classes de fertilité dans une étude en Allemagne (Hammel 2002). Cette variable ne semble alors pas la plus pertinente pour décrire la production foliaire.

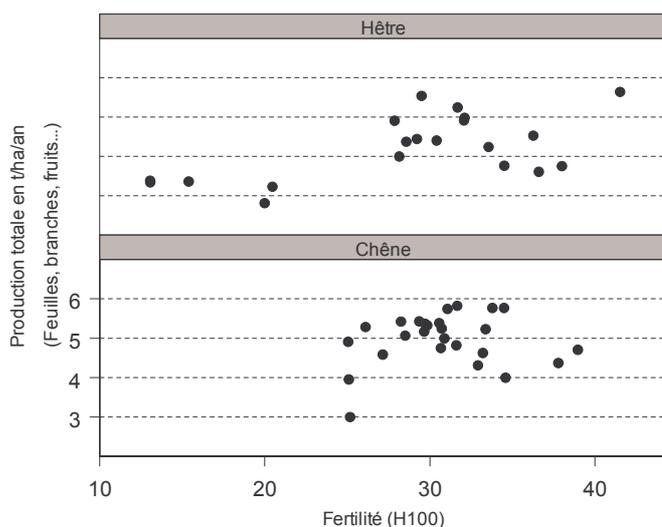


Figure A27 : Production totale de litière × Fertilité pour le Chêne (tous chênes confondus) et le Hêtre

Les conditions climatiques ont été recalculées à l'aide du modèle *Aurelhy* de Météo France (Bénichou et le Breton 1987) par Christian PIEDALLU, connaissant les coordonnées Lambert II des placettes. En ce qui concerne la température, l'effet n'est significatif ni pour le Chêne ni pour le Hêtre.

En revanche, la figure A28 illustre la dépendance négative des chutes de litière avec les précipitations, en particulier pour le Hêtre. Ce résultat est assez contraire à l'intuition : on imagine plus facilement que plus il pleut, plus la production de feuilles et autres est importante.

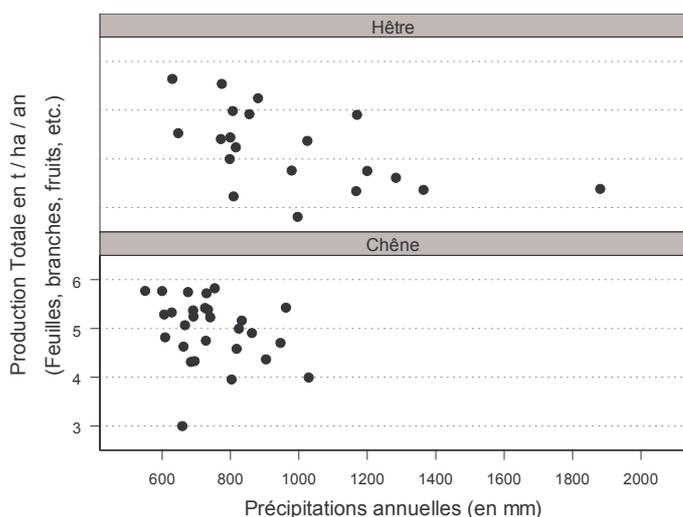


Figure A28 : Production totale (feuilles, branches, fruits, etc...) en fonction des précipitations

En réalité, les précipitations sont très fortement corrélées avec l'altitude (corrélation de 0,8). Il est alors plus pertinent de s'intéresser à cette variable qui est très intégratrice du climat.

Pour le Hêtre, l'altitude a un effet négatif significatif sur la production de litière. En revanche, pour le Chêne, il n'y en a pas. Cependant, le Hêtre est une essence beaucoup plus plastique, que l'on peut trouver dans de très larges gammes d'altitude. De plus, lorsque les productivités foliaires des deux essences sont placées sur le même graphique, les nuages de points sont très proches. Un modèle commun est alors construit (figure A29).

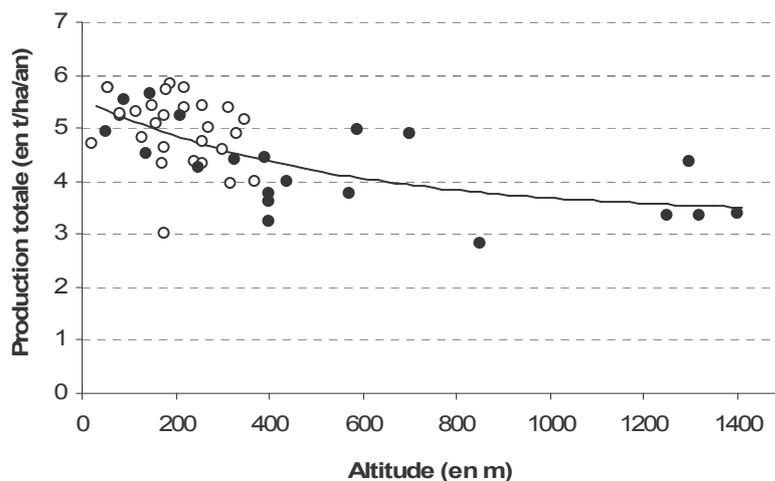


Figure A29 : Effet de l'altitude sur la production de litière pour le Chêne (o) et le Hêtre (●)

Le modèle est de type exponentiel. Un ajustement avec une constante spécifique a montré qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux essences, d'où

$$\text{Masse} = a + b \times \exp(-c \times \text{Altitude}) \quad [A11]$$

Les résultats statistiques sont présentés dans le tableau A8.

	Valeur	Ecart-type	Pr(> t)
a	3,37	0,53	< 10 ^{E-4}
b	2,19	0,47	< 10 ^{E-4}
c	0,0020	0,0011	0,09

Tableau A8 : Valeur des paramètres d'ajustement pour le modèle [A11]

Pour l'utilisation de ces modèles, il faut néanmoins prendre garde à la gamme altitudinale. Les valeurs pour le Chêne varient de 0 à 400 m et de 0 à 1 400 m pour le Hêtre.

II.4 – 1.3. Proportion de feuilles et de branches

Dans le chapitre précédent, la litière est considérée dans son ensemble sans séparer les différents compartiments, comptabilisés en bloc (feuilles, branches et fruits de l'essence principale, reste). Des essais de modèles en les séparant ne donnent pas de meilleurs résultats, en particulier pour les branches et les fruits qui augmentent moins graduellement que les feuilles.

Il faut alors travailler sur la répartition branches / feuilles de l'essence principale. La production des fruits est marginale par rapport à ces deux compartiments, et ne sera pas prise en compte. La même base de données est utilisée.

Si les feuilles tombent de manière assez régulière, il n'en est pas de même pour les branches. Dans chaque placette, les chutes sont collectées dans dix bacs à litière de 0,5 m², soit une surface totale de 5 m². L'apport d'une branche supplémentaire modifie considérablement le pourcentage d'une collecte. Pour pallier ce problème, les feuilles et les branches sont ont été cumulées séparément sur l'ensemble des relevés. Au bout des 10 ans de collecte environ le pourcentage est suffisamment bien stabilisé (figure A30) pour être fiable.

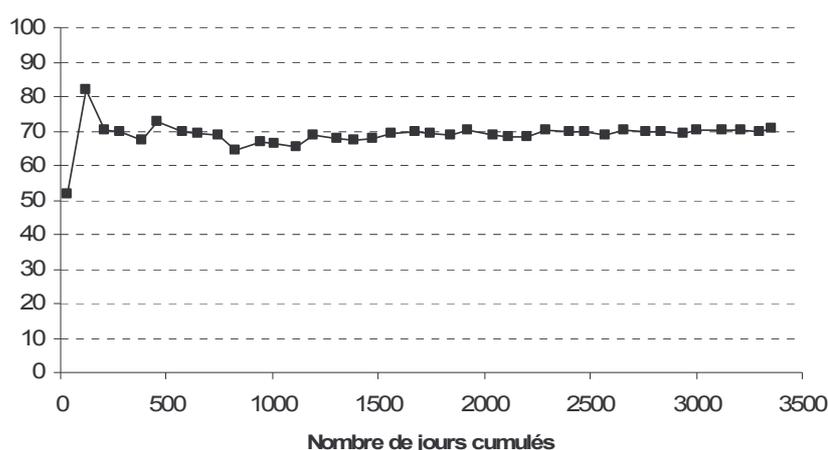


Figure A30 : Evolution du pourcentage de feuilles par rapport aux chutes de feuilles et branches au cours du temps (placette CHP 49)

Les résultats sont différents pour le Chêne et le Hêtre, mais très peu variables pour une essence donnée. De plus, aucune des variables à disposition n'a d'influence sur ce pourcentage. Les valeurs numériques sont données dans le tableau A9.

	<i>Pourcentage de feuilles</i>	<i>Ecart-type</i>	<i>Nb d'observations</i>
<i>Chêne</i>	72,9 %	3,7	26
<i>Hêtre</i>	79,1 %	4,6	20

Tableau A9 : comparaison par essence des pourcentages de feuilles par rapport à feuilles + branches

Froment (1969) mesure dans la litière d'un peuplement de chênes en Belgique 60% de feuilles et 27% de branches et rameaux, le reste étant les fruits, écailles, fleurs et un mélange non trié. Cela correspond à 69,8% de feuilles par rapport au total feuilles + branches ce qui concorde bien avec nos valeurs. Möller (1954) estime les chutes de feuilles de Hêtre à 2,7 t / ha et de branches à 1,0 t / ha pour un peuplement mature, soit un pourcentage de 73,0 %.

II.4 – 1.4. Cas des autres essences

Dans ce paragraphe, l'objectif est de transposer les résultats obtenus sur le Chêne et le Hêtre aux deux autres essences étudiées dans la thèse : le Douglas et le Pin laricio, pour lesquels les données sont beaucoup plus réduites. Les informations sur les autres Pins (maritime et sylvestre) sont conservées.

Il y a 6 peuplements de Douglas et 23 de Pins (2 de Pins laricio, 7 de Pins maritimes et 14 de Pins sylvestres).

Deux raisons de natures différentes conduisent à n'utiliser qu'une constante pour la production de litière de ces essences :

- les résultats sur le Chêne et le Hêtre n'ont fait ressortir que très peu d'influence des différentes variables disponibles
- nous voulons utiliser ces résultats dans le cadre de la thèse uniquement afin de fournir des entrées de litière pour le modèle de sol, et non pour fournir un modèle précis de chutes de litière

D'autre part, l'essence étudiée pour la thèse est le Pin laricio et non les autres espèces de Pins. Or deux valeurs seulement sont disponibles pour cette essence. Une analyse de variance est dans un premier temps conduite afin d'appréhender les différences entre les essences.

Les productions des différentes essences sont comparées deux à deux. Les résultats sont présentés le tableau A10. Le Douglas est significativement différent des trois autres essences, mais en revanche, les trois espèces de Pins ont des niveaux de production statistiquement semblables. Ce résultat conduit à les grouper afin d'estimer la production de litière d'un ensemble « Pins » pris sans distinction d'espèce.

		Douglas	Pin laricio	Pin maritime	Pin sylvestre
Douglas	(n=6)		***	***	***
Pin laricio	(n=2)	***		ns	ns
Pin maritime	(n=7)	***	ns		ns
Pin sylvestre	(n=14)	***	ns	ns	

Tableau A10 : comparaison par essence des productions de litière, les cases notées « *** » correspondent à des différences significatives le nombre d'observations est donnée entre parenthèses

Le même travail que pour les Chênes et Hêtre est mené sur le pourcentage de branches et de feuilles. Contrairement à la quantité de chutes de litière, il n'est pas possible de grouper tous les pins, mais seulement le Pin laricio et le Pin sylvestre. Les résultats figurent dans le tableau récapitulatif A11. Les résultats pour l'Epicéa et le Sapin sont présentés, bien que ces essences ne soient pas considérées dans le cadre de la thèse. La valeur du Douglas paraît très faible, elle est peut être due au jeune âge des placettes : 28 ans en moyenne (Ponette *et al.* 1997).

	Prod. Moyenne (en t / ha / an)	Ecart-type	Pourcentage de feuilles	Ecart-type	Nb. d'observations
Chêne	4,97	0,66	72,9 %	3,7 %	26
Hêtre	4,22	0,81	79,1 %	4,6 %	20
Douglas	2,37	0,51	88,6 %	3,7 %	6
Pin laricio	4,21	0,76	70,4 %	5,3 %	2
Pin sylvestre					14
Pin maritime					7
Epicéa	3,40	0,81	84,6 %	5,0 %	11
Sapin			77,4 %	4,3 %	11

Tableau A11 : Tableau récapitulatif des valeurs moyennes de production (en t de matière sèche) et de pourcentage de feuilles pour les différentes essences

II.4 – 1.5. Pourcentage de carbone dans la matière sèche

Dans les données de chutes de litière du réseau RENECOFOR figurent également 1 140 mesures de concentration de carbone dans la matière sèche pour les différents compartiments (feuilles de l'essence principale, branches de l'essence principale, fruits de l'essence principale et reste).

Ces données permet de révéler une légère distinction entre les résineux et les feuillus. En revanche, les différences entre les compartiments sont trop minimes pour être conservées. Ce résultat est très stable aussi bien intra- qu'inter-essence. Les résultats du tableau A12 concordent bien avec la littérature (Brown 1997, Dupouey *et al.* 1999, Le Dantec 2000, Huet 2004).

	Taux de carbone de la matière sèche	Ecart-type	Nombre d'observations
<i>Feuillus</i>	50,8	2,1	530
<i>Résineux</i>	52,9	2,7	575

Tableau A12 : Pourcentage de carbone dans la matière sèche des litières

Les résultats de cette sous-partie permettent d'avoir une idée assez fine des apports de carbone qui seront utilisés pour effectuer les simulations avec le modèle *Century*, mais aussi pour faire des distinctions entre essence pour élaborer le modèle statique du carbone du sol.

II.4 – 2. Modèle statique du carbone du sol

Afin de rendre compte de façon synthétique et descriptive des informations des bases de données des réseaux Européen et RENECOFOR, un modèle *statique* est développé. Il s'agit en effet d'un modèle ne comportant aucune dépendance au temps. Ce n'est pas un modèle *dynamique* et il n'a en aucun cas vocation à se substituer à *Century*.

En revanche, il doit permettre de tracer les grandes tendances en fonction des différents facteurs climatiques, pédologiques et autres, qui pourront, une fois comparées à l'analyse de sensibilité de *Century*, accréditer ou non l'utilisation de ce modèle pour la problématique de la thèse.

II.4 – 2.1. Définition de l'objet étudié

Le terme « carbone du sol » peut recouvrir maintes définitions. Il est donc indispensable de décrire précisément l'objet de la modélisation.

Lors des observations, les concentrations de carbone, et non les stocks, sont mesurées. Or, pour évaluer l'impact de la sylviculture sur la fonction puits de carbone, les stocks sont nécessaires. La densité apparente est disponible dans les données. La variable modélisée est alors bien un stock, produit de la concentration par la densité apparente.

D'autre part, si les humus ont des concentrations de carbone très importantes, leurs stocks sont faibles par rapport à ceux des horizons minéraux (~7,5% du total). Ensuite, leur quantité est très dépendante de facteurs ponctuels comme par exemple les éclaircies, et leur modélisation à l'aide de variables réagissant à des échelles de temps longues aurait peu de sens. Cela incite à traiter séparément les humus et les horizons minéraux. Enfin, les données concernant les humus sont disponibles pour la grande majorité des points du réseau RENECOFOR, mais sont assez partielles pour le réseau européen. Les prendre en compte aurait conduit à restreindre sévèrement le nombre d'observations disponibles. En conséquence, le stock de carbone modélisé ne prendra pas en compte les humus.

La borne supérieure en hauteur pour la partie du sol prise en compte est donc fixée par la limite entre l'humus et le haut des horizons minéraux. C'est la hauteur 0. Il faut alors fixer la profondeur de sol qui sera prise en compte. Il y a là la confrontation entre d'un côté les objectifs d'un modèle décrivant le carbone du sol, et d'un autre les processus qui ont conduit à l'élaboration du stock actuel.

En effet, l'intérêt du modèle de sol est d'estimer avec des variables simples les stocks de carbone actuels afin d'évaluer si le modèle *Century* rend correctement compte des variations dues aux différents facteurs tels que la température, la pluviométrie, l'essence... Il s'ensuit que plus la profondeur prise en compte sera grande, plus le modèle sera proche de la valeur réelle du stock de

carbone. Celui-ci s'est constitué à des échelles de temps géologiques, et même si le carbone enfoui le plus profondément est très stable, il s'agit de celui qui contribue le plus à l'élaboration d'un stock de carbone à long terme. Même si l'on estime à plus de 50% la part des forêts françaises issues de la déprise agricole depuis le début du XIX^e siècle (Koerner *et al.* 1999, Koerner *et al.* 2000, Dupouey *et al.* 2002), nous considérerons que l'échelle de temps de la constitution des sols forestiers est suffisamment grande pour prendre en compte le carbone profond.

Dans le cas du rapport d'expertise de l'Inra pour la contribution à la lutte contre l'effet de serre (Arrouays 2002) pour le compte du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, l'objectif est différent. Il s'agit d'avoir un modèle permettant d'estimer les variations possibles dues à des modifications des usages du sol pour l'élaboration de politiques d'incitation au stockage de carbone. Dans ce cas, l'échelle de temps considérée est inférieure au siècle, et les horizons les plus susceptibles de varier sont les horizons superficiels. Dans ce rapport, la profondeur prise en compte est la couche de sol comprise entre 0 et 30 centimètres.

Dans le cas présent, il s'agit alors d'obtenir un compromis entre la profondeur la plus grande possible, et la perte de données lorsqu'on atteint des couches profondes. La valeur retenue est 60 cm. Dans un autre article, Arrouays et Péliissier (1994) donnent un modèle de carbone en fonction de la profondeur en forme de décroissance exponentielle. En ajustant cette forme de modèle sur les données du réseau RENECOFOR pour lequel la majorité des mesures de carbone est disponible jusqu'à 1 mètre de profondeur, il est possible d'estimer le pourcentage omis en ne prenant pas en compte les horizons plus profonds que 60 cm.

A partir des données du réseau RENECOFOR, il est possible de calculer la moyenne du carbone par couche (couches 0-10 ; 10-20 ; 20-40 ; 40-80 ; et 80-100 cm de profondeur) de tous les points dont les valeurs sont disponibles. Cela permet de donner une valeur moyenne de stock par centimètre d'épaisseur en fonction de la profondeur. Les résultats sont illustrés dans la figure A31. L'ajustement d'un modèle exponentiel sur ces points donne l'équation suivante

$$C(z) = 3,36 \times \exp(-0,0295 \cdot z) \quad [A12]$$

où z est la profondeur.

Pour connaître le stock de carbone entre l'horizon 0 et un horizon à la profondeur z , il suffit alors de calculer l'intégrale de [A12] entre 0 et cette valeur. Lorsqu'on intègre [A12], on obtient une croissance exponentielle vers une asymptote.

$$C(0 - z) = \frac{3,36}{0,0295} \times (1 - \exp(-0,0295 \cdot z)) \quad [A13]$$

D'où, lorsqu'on calcule le stock de carbone total ($z = \infty$), on obtient 113,9 t C / ha. Pour le stock entre 0 et 30 cm, 66,9 t C / ha et pour le stock 0-60 cm, 94,5 t C / ha. Ainsi, l'estimation du carbone non pris en compte par la limitation à 60 cm est de l'ordre de 19,4 t C / ha, soit environ 17 %. Le stock omis en ne prenant que les 30 premiers centimètres comme dans le rapport d'expertise de l'Inra est de 47,0 t C / ha, soit 41,3 %. Notons que le coefficient de passage du stock 0-30 cm par rapport au carbone total est d'environ 1,7, ce qui est très largement supérieur au coefficient 1,2 donné dans le rapport d'expertise. Enfin, pour comparer les valeurs de la présente étude à celle de l'Inra, le coefficient adopté sera 1,4.

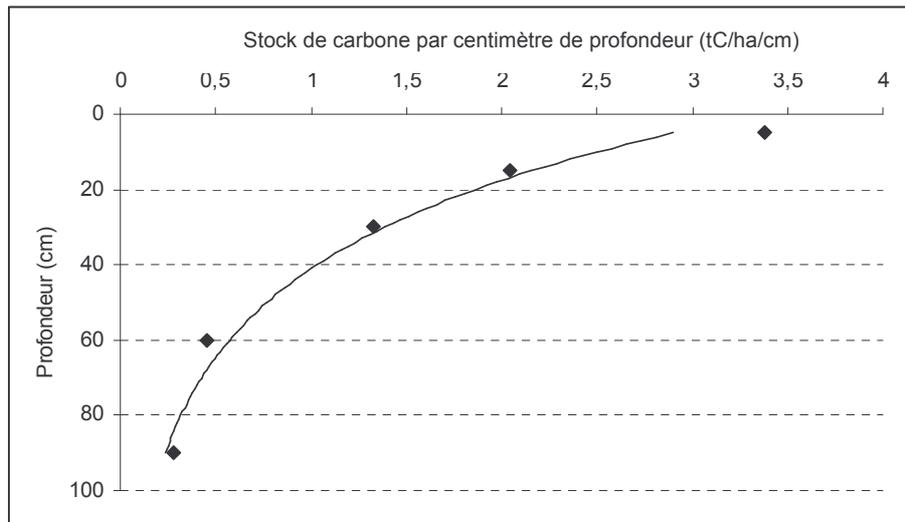


Figure A31 : Stock de carbone linéaire en fonction de la profondeur

Une étude comportant une base de données de plusieurs milliers de profils de sols forestiers (Jobbagy et Jackson 2000) donne une quantité de carbone de la couche 0-20 cm égale à 50 % de la couche 0-100 cm de profondeur. Lorsqu'on utilise l'ajustement *A13*, on obtient pour les mêmes profondeurs 47%, ce qui est très comparable.

Finalement, le groupement des données disponibles dans le réseau européen et le réseau RENECOFOR forme une base de 551 valeurs du carbone compris dans la couche entre 0 et 60 cm.

II.4 – 2.2. Construction du modèle

Une première approche de la base de données avec le logiciel de statistiques *S-Plus* (2000) montre la très grande variabilité des valeurs de stocks de carbone. Il a néanmoins été possible de révéler des tendances avec certains facteurs. D'un autre côté, certaines variables sont apparues de manière assez surprenante sans effet sur le stock de carbone. Ce paragraphe décrit la démarche utilisée afin d'extraire le maximum d'enseignements des données disponibles.

Dans un premier temps, toutes les variables ont été testées avec le logiciel *S-Plus*. Les régressions simples pour les variables quantitatives et les analyses de variance pour les variables qualitatives ont donné des résultats parfois significatifs, mais très peu probants, avec des coefficients de détermination extrêmement faibles.

Le graphique de la figure *A32* est un exemple pour illustrer la très grande variabilité des stocks de carbone. On constate que la variance est assez homogène mais très importante, ce qui explique les résultats peu concluants des régressions.

Ces premiers essais n'étant pas satisfaisants, des groupes ont été créés dans la base de données afin de travailler sur des ensembles plus homogènes. En effet, les conditions sont très différentes d'un site à l'autre et il a alors été préconisé de tester les variables sur des situations *a priori* plus comparables. Deux classements ont alors été effectués et testés indépendamment. Le premier a consisté à choisir des types de sols homogènes, et le second de grouper les données d'après l'essence forestière majoritaire dans le couvert, et de tester les variables de manière intra-spécifique.

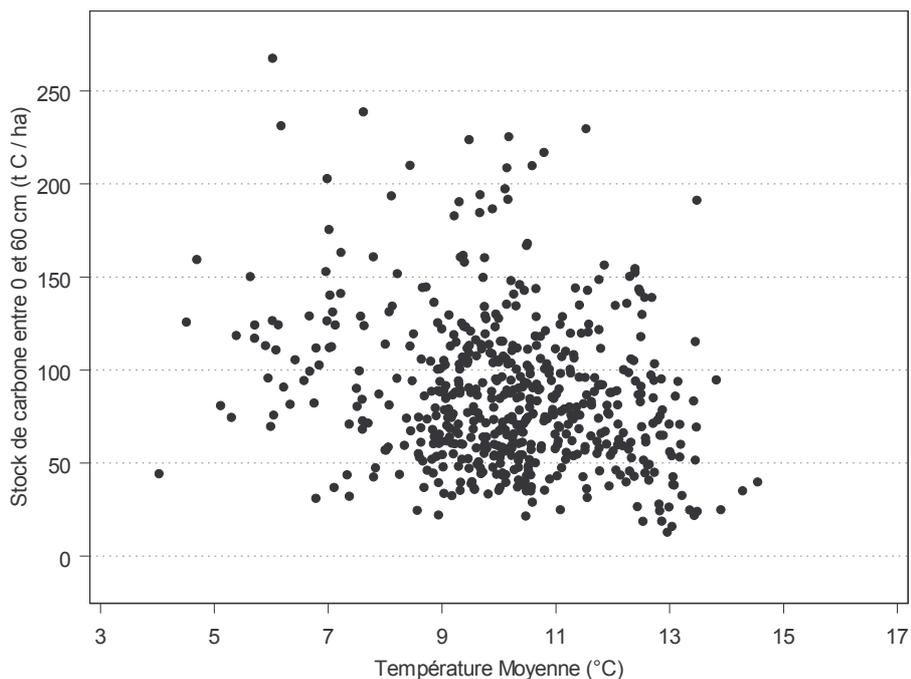


Figure A32 : Stocks de carbone des couches comprises entre 0 et 60 cm de profondeur en fonction de la température moyenne annuelle du site.

Groupement par type de sol

Plusieurs groupements de sols ont été testés. D'abord, les groupes tels qu'ils sont définis dans le rapport de Badeau (1998) dans le rapport des Cahiers du DSF sur la partie française des données du réseau européen. Les sols sont constitués en 7 grands ensembles selon leurs propriétés physico-chimiques et les processus pédogénétiques qui les gouvernent (sols calcaires, sols bruns, sols acides désaturés, sols podzolisés, sols lessivés, sols hydromorphes et sols alluviaux). Notons qu'au sein de chacun de ces grands ensembles, des sous-ensembles sont définis, mais n'ont que peu été utilisés dans ce travail.

Une analyse de variance en fonction de ces groupes de sol n'a pas révélé d'effet significatif sur le carbone des horizons minéraux. La variance est tellement grande que les intervalles de confiance se chevauchent largement.

Face à ces résultats, des groupes de sols plus larges ont été définis avec l'aide d'Etienne DAMBRINE, biogéochimiste à l'INRA, afin de construire 3 grands ensembles avec les sols les plus communs, en écartant les sols particuliers, et dans lesquels les variables à disposition pourraient avoir une influence significative. Ce travail a d'abord été effectué sur les données du réseau européen. Le premier des trois grands groupes rassemble les sols calcaires de surface ou peu profonds de type RENDOSOLS, CALCOSOLS ou RENDOSOLS et comporte 64 observations. Le deuxième groupe, le plus large avec 299 points, comporte les sols calciques, tous les sols bruns à l'exclusion des ANDOSOLS et certains sols acides (ALOCRISOLS). Le troisième groupe comprend les sols lessivés avec des traces d'hydromorphie (56 observations).

La formation de ces groupes a écarté beaucoup de données, mais a constitué des sous-ensembles suffisamment homogènes et importants pour tester les effets des différentes variables par groupe.

Ce travail n'a pas abouti à des résultats meilleurs que lorsque les données étaient traitées dans leur ensemble. La figure A33 et montre la variabilité du carbone pour chacun des groupes et illustre l'absence d'influence du groupe sur le stock de carbone.

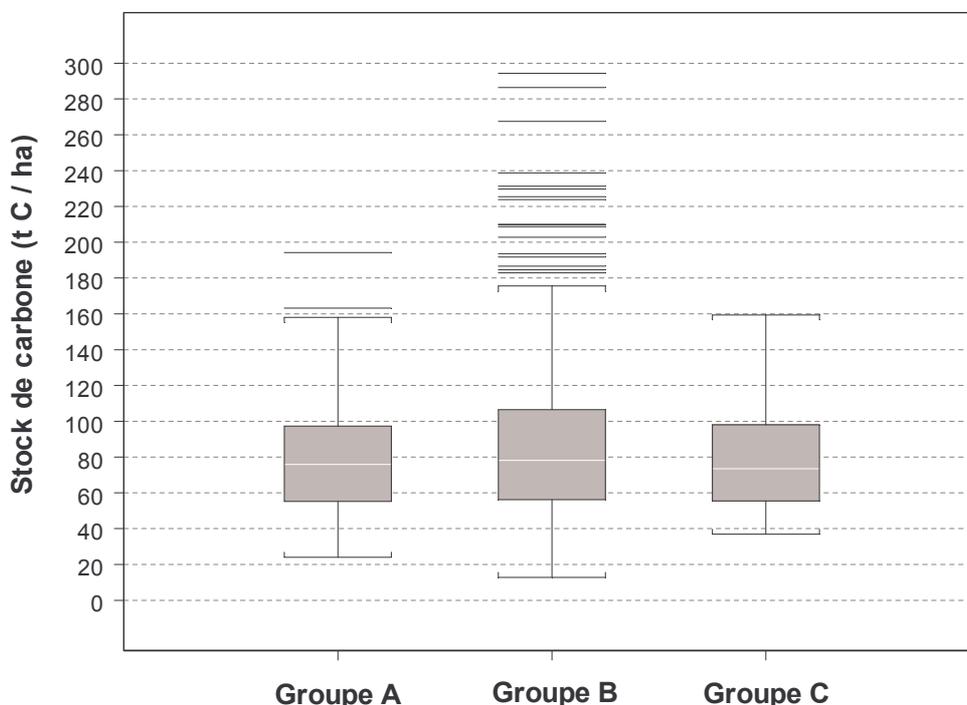


Figure A33 : Valeurs des stocks de carbone par groupe (voir texte).

Les carrés grisés représentent le 1^{er} et le 3^{ème} quartiles,

la ligne blanche est la valeur médiane,

les traits horizontaux sont l'ensemble des valeurs en dehors de l'intervalle de confiance

Les valeurs de stocks de carbone des trois grands groupes de sols sont très similaires. Le même travail a été conduit avec les données du réseau RENECOFOR dans un deuxième temps. La séparation des analyses suivant les deux réseaux a permis de s'assurer que l'absence de tendance en fonction du type de sol n'est pas d'une erreur de manipulation des données. Les résultats avec les données du réseau RENECOFOR sont identiques.

Cependant, l'absence de différence des valeurs moyennes sur les stocks de carbone n'implique pas nécessairement qu'au sein de chaque groupe les résultats seront identiques à ceux lorsque les données sont groupées. Les analyses ont alors été menées groupe par groupe, mais une fois encore sans résultat concluant.

En conclusion, le groupement par type de sol a été abandonné.

Groupement par essence

Le second type de groupement est spécifique. Pour les données RENECOFOR, l'essence principale du peuplement est renseignée, et pour le réseau européen, elle a été évaluée à l'aide des coefficients d'abondance / dominance de la strate arborescente. Ainsi, les observations ont pu être classées en 8 groupes d'essences : Chêne, Douglas, Epicéa, Hêtre, Pins (hors Pin maritime), Pin maritime, Sapin et « Autres ». Cette analyse, qui a donné de meilleurs résultats que la précédente, est détaillée plus largement.

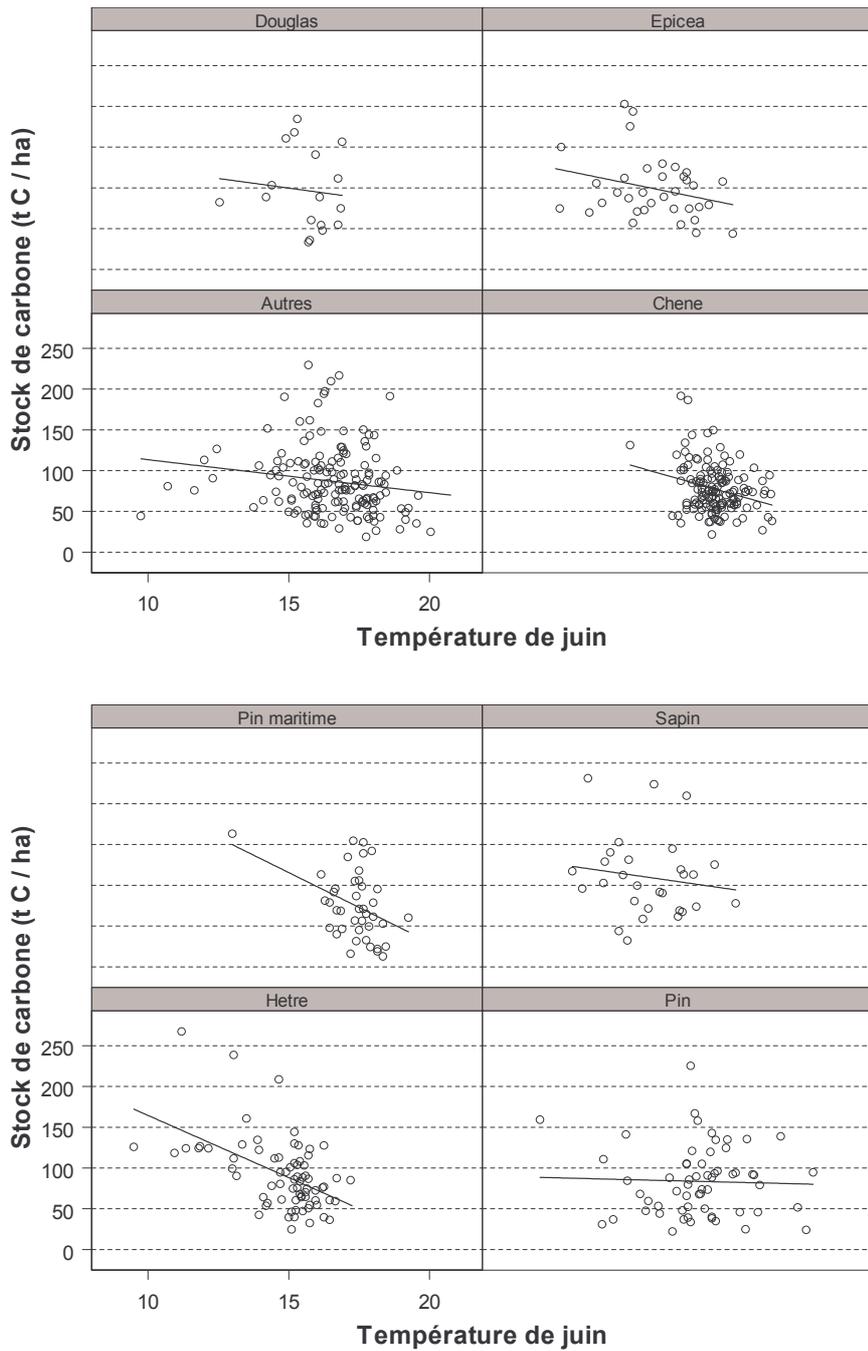
Tout d'abord, il y a un effet de la température sur le stock de carbone des couches entre 0 et 60 cm de profondeur pour certaines des essences. La température moyenne annuelle est significative, mais les ajustements sont meilleurs lorsqu'on la remplace par la valeur moyenne des températures de juin. Le tableau A13 et les figures A34 récapitulent les résultats d'ajustements linéaires intra-spécifiques.

	Régression	Pr(> t)	R ²	Nb. obs.
<i>Chêne</i>	236,1 – 9,8 × Temp Juin	0,001	0,07	141
<i>Douglas</i>	--	0,67	--	17
<i>Epicéa</i>	198,1 – 7,0 × Temp Juin	0,10	0,07	35
<i>Hêtre</i>	317,2 – 15,5 × Temp Juin	< 10 ^{E-4}	0,26	73
<i>Pins</i>	--	0,78	--	60
<i>Pin maritime</i>	372,2 – 17,1 × Temp Juin	0,01	0,16	41
<i>Sapin</i>	--	0,45	--	29
<i>Autres</i>	153,8 – 4,0 × Temp Juin	0,04	0,03	155
<i>Toutes essences</i>	193,8 – 6,8 × Temp Juin	< 10 ^{E-4}	0,08	551

Tableau A13 : Résultats des ajustements par essence en fonction de la température du mois de juin

Les figures A34 montrent en particulier que les nuages de points sont tous orientés dans le même sens, c'est à dire une baisse du stock de carbone en fonction de la température, ce qui est un résultat en accord avec la littérature (Kirschbaum 1995, Townsend *et al.* 1997, Jobbagy et Jackson 2000).

Ces nuages sont certes très diffus, mais la significativité du facteur est le résultat le plus intéressant pour connaître les grandes tendances.



Figures A34 : Graphiques représentant les nuages de points stock de carbone entre 0 et 60 cm de profondeur \times Température de juin pour les 8 différents groupes d'essence

Ensuite, les précipitations annuelles sont une autre variable climatique de grande importance. Elle a également été testée avec succès sur les données classées par essence. Les résultats sont reportés dans le tableau A14.

	Régression	Pr(> t)	R ²	Nb. obs.
<i>Chêne</i>	38,4 + 0,047 × PPT	0,003	0,06	141
<i>Douglas</i>	-71,4 + 0,165 × PPT	0,02	0,29	17
<i>Epicéa</i>	54,2 + 0,034 × PPT	0,12	0,07	35
<i>Hêtre</i>	44,8 + 0,043 × PPT	0,01	0,08	73
<i>Pins</i>	45,7 + 0,043 × PPT	0,09	0,05	60
<i>Pin maritime</i>	--	0,57	--	41
<i>Sapin</i>	-11,2 + 0,092 × PPT	0,004	--	29
<i>Autres</i>	53,7 + 0,037 × PPT	0,01	0,04	155
<i>Toutes essences</i>	39,6 + 0,048 × PPT	< 10 ^{E-4}	0,10	551

Tableau A14 : Résultats des ajustements par essence en fonction des précipitations annuelles

Les résultats, bien qu'ayant toujours des coefficients de détermination très faibles, sont plus significatifs que pour la température. En effet, les précipitations ne sont pas significatives uniquement dans le cas du Pin maritime. Il faut néanmoins noter que la probabilité du test t pour l'Epicéa est assez élevée, mais l'effet peut être considéré significatif. De plus, dans tous les cas, le coefficient des précipitations est positif et sensiblement le même pour toutes les essences. Un grand nombre d'auteurs ont déjà fait ce constat (Post *et al.* 1982, Jobbagy et Jackson 2000, Zinke et Stangenberger 2000, Schuur *et al.* 2001, Callesen *et al.* 2003, Sun *et al.* 2004).

Les autres variables ont également été testées sans faire ressortir d'effet significatif.

La température du mois de juin et les précipitations annuelles prises séparément sont deux variables ayant un effet sur le stock de carbone des couches entre 0 et 60 cm de profondeur. Des régressions multiples (avec ces deux variables) intra-spécifiques ont cependant montré que l'effet est assez peu stable. Par exemple, dans le cas du Hêtre, en régression simple, les deux variables sont significatives, alors que les précipitations ne ressortent plus en régression multiple. Dans le cas du groupe d'essence « Autres », c'est l'inverse : la température devient non-significative. Enfin, dans le cas du Chêne, les deux variables le restent. De plus, lorsque que l'on teste le même ajustement en régression simple, mais en écartant quelques observations, et en particulier les points pour lesquels les valeurs de carbone sont les plus élevées, les ajustement restent significatifs, mais les coefficients peuvent varier de façon importante. Par exemple, lorsque les trois observations ayant les plus grandes valeurs de stocks de carbone sont écartées dans le cas du Hêtre, la température reste fortement significative, mais le coefficient passe de -15,5 à -10,4. Il s'agit néanmoins d'un cas extrême.

D'une part, les ajustements sont assez peu stables. D'autre part, même s'ils sont faibles, les effets sont similaires pour toutes les essences. Enfin, on peut imaginer que la température et les précipitations influent sur le stock de carbone par une accélération ou un ralentissement des processus de décomposition au niveau des micro-organismes (Post *et al.* 1982, Jobbagy et Jackson 2000, Sun *et al.* 2004), et que ces effets sont alors indépendants de l'essence considérée. En revanche, les essences et les facteurs climatiques sont de manière évidente corrélées. Dans des climats les plus frais, on trouvera plutôt le Hêtre, l'Epicéa ou le Sapin, alors que le Chêne sera dans des climats plus chauds. Ces remarques conduisent à envisager un modèle avec des effets

identiques pour toutes les essences de la température du mois de juin de la pluviométrie, mais avec des constantes dépendant de l'espèce. Le modèle est donc

$$\text{Carbone} = \alpha_{\text{essence}} + \beta \times \text{Température de Juin} + \gamma \times \text{PPT annuelles} \quad [A14]$$

L'ajustement de ce modèle à l'aide du logiciel *S-Plus* donne des effets très significatifs de la température et des précipitations. Cependant, les constantes spécifiques sont proches et sont statistiquement indifférenciables dans ce modèle. Bien que les valeurs moyennes de stocks de carbone soient différentes suivant les essences, les tendances avec la température et les précipitations masquent la spécificité.

Finalement, le classement des observations par essence principale du peuplement a permis de faire ressortir l'importance de la température du mois de juin et des précipitations annuelles, mais ne conduit pas à avoir de composante spécifique dans le modèle final. Le groupement par essence sera également abandonné.

Le nouveau modèle est alors le même que [A14] avec une constante non spécifique.

Autres variables significatives

Les deux variables formant la première ébauche du modèle sont celles qui ressortent le plus facilement en régression simple. D'autres variables qui n'étaient jusqu'alors pas significatives peuvent avoir des effets révélés une fois que les effets de la température et des précipitations sont extraits. La méthode a consisté à poursuivre les régressions multiples avec pour base les deux premières variables et en testant les autres.

La première à se dégager est la fraction de limons plus argiles de la terre fine du sol. Plus cette fraction est élevée, plus le sol contient du carbone. Notons que cette fraction est complémentaire de la quantité de sable, donc plus le sol est sableux, moins le stock de carbone est élevé. Ce résultat semble valable aussi bien pour les sols forestiers que pour les sols agricoles (Burke *et al.* 1989, Bosatta et Ågren 1997).

Finalement, les coordonnées Lambert longitudinales ont aussi un effet sur le stock de carbone. Plus on est à l'est, plus les stocks sont élevés. Néanmoins, si ce facteur est significatif, sa gamme de variation est faible. L'explication de ce phénomène est délicate car il est difficile de voir clairement les différences entre l'est et l'ouest, dans la mesure où les facteurs climatiques sont déjà pris en compte, et que l'altitude n'intervient pas. Il pourrait s'agir d'un ancien usage des sols, en particulier pour les landes Bretonnes qui ont beaucoup évolué (Dambrine, *comm. pers.*) et dont les points se trouvent en extrémité du nuage, ce qui augmente leur poids statistique.

II.4 – 2.3. Résultats numériques

Le modèle final est alors le suivant :

$$\text{Carbone} = \alpha + \beta \times \text{TempJuin} + \gamma \times \text{PPT} + \delta \times \text{LimonsArgile} + \eta \times \text{LIIx} + \varepsilon \quad [A15]$$

où *TempJuin* est la température mensuelle moyenne du mois de juin (en °C), *PPT* est la somme des précipitations annuelles (en mm), *LimonsArgile* est la fraction de limons + argiles dans la terre fine du sol et *LIIx* est la coordonnée Lambert II longitudinale (en km). Les valeurs numériques de l'ajustement de ce modèle sont données dans le tableau A15. L'écart-type résiduel est de 37,5 tC/ha, et il y a 545 degrés de liberté.

a)	Valeur	Ecart-type	Pr(> t)	b)			Variation engendrée
				Valeur min	Valeur max		
α	126,5	22,1	$< 10^{E-4}$				
β	-4,57	1,08	$< 10^{E-4}$	Température Juin	9,5	20,7	- 51 tC/ha
γ	0,037	0,007	$< 10^{E-4}$	Précipitations Ann.	525	2068	+ 57 tC/ha
δ	13,6	6,0	0,022	Limons Argiles	0,12	0,92	+ 11 tC/ha
η	-0,017	0,008	0,035	Lambert II X	160	1170	- 17 tC/ha
				σ	37,5 tC/ha		
				DDL	545		

Tableau A15 : a) Valeur des paramètres d'ajustement du modèle [A15]
b) gamme de variation des facteurs correspondants

Le tableau A15b) fait ressortir les variations maximales du stock de carbone impliquées par chaque variable. Il faut préciser néanmoins que ces variables sont un peu corrélées entre elles (cf. tableau A16).

	TempJuin	PPT annuelles	Limons & argile	Lambert II X
TempJuin	1	0,4065	0,0171	0,1614
PPT annuelles	0,4065	1	-0,0449	-0,0967
Limons & argile	0,0171	-0,0449	1	-0,2266
Lambert II X	0,1614	-0,0967	-0,2266	1

Tableau A16 : Matrice des corrélations entre coefficients de l'ajustement

Ces précisions étant énoncées, la variation du stock de carbone est d'environ -51 tonnes à l'hectare entre la température la plus basse et la température la plus élevée. Les précipitations induisent une variation de 57 tonnes à l'hectare, 11 tonnes pour la texture du sol, et environ 17 tonnes pour la longitude.

Les variables les plus influentes sont celles liées au climat.

II.4 – 2.4. Variables non significatives

Le modèle tel qu'il est construit indique 4 variables significatives. La non significativité des autres variables est également un résultat intéressant, d'autant plus qu'il est parfois surprenant.

En particulier, il n'a pas été possible de mettre en évidence d'effet du type de sol sur le stock de carbone, que l'on travaille sur des petits groupes de sols, ou bien sur des ensembles plus larges. Cependant, la variabilité est très grande, et c'est probablement la raison pour laquelle l'effet n'est pas statistiquement significatif. Par exemple, il est possible de trouver dans la bibliographie des effets du type de sol mis en évidence, mais avec des variances très importantes (Rodriguez-Murillo 2001). Il faudrait un nombre d'observations beaucoup plus grand pour que la différence soit statistiquement prouvée. De même, la quantité de terre fine par mètre carré de sol (entre 0 et 60 cm de profondeur) n'a pas non plus d'influence sur le stock de carbone, ni la profondeur prospectable.

Un autre résultat surprenant est l'absence d'influence du pH sur le stock. Lorsque qu'il est ajouté aux 4 variables du modèle, il n'est pas plus significatif qu'en régression simple. Le nuage de points carbone en fonction du pH est donnée figure A35. Un résultat similaire a déjà été reporté par Jenkinson (1977) qui a suivi au ^{14}C la décomposition de ray-grass sur 6 sols. Tous ces sols ont sensiblement la même proportion d'argiles mais une gamme de pH de 3,7 à 8,1 et les taux de décomposition sont identiques.

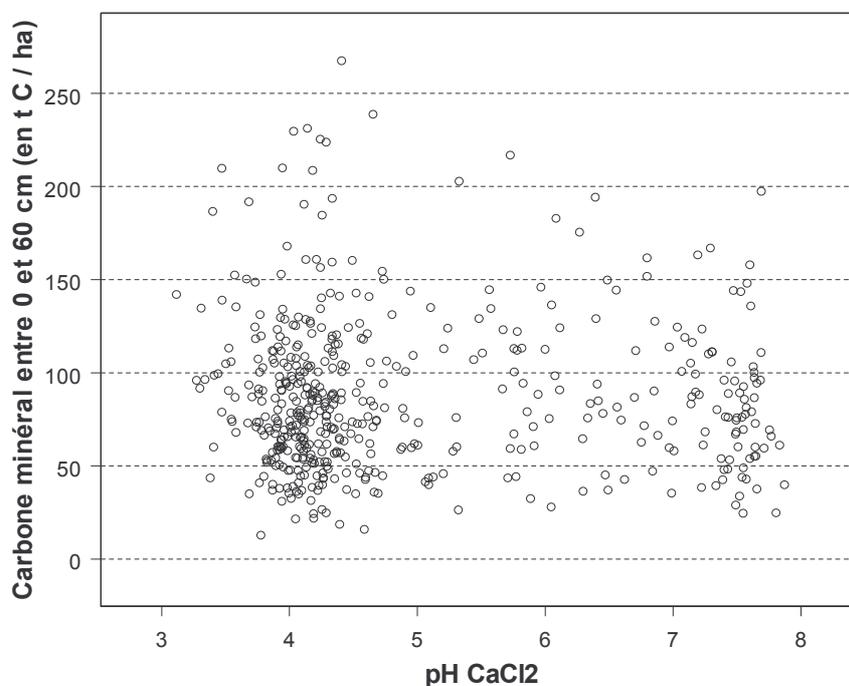


Figure A35 : Carbone du sol en fonction du pH

Les effets liés à l'essence principale du peuplement sont également non significatifs. Cependant, l'analyse de sensibilité a montré que le stock de carbone augmente proportionnellement avec la quantité de chutes de litière, et qu'il augmente également avec le rapport lignine sur azote. Or les valeurs de ce rapport trouvées dans la bibliographie pour le Chêne, le Hêtre et le Pin laricio sont dans le sens d'une compensation de l'effet lié à la quantité de chutes de litière. Ce n'est pas le cas pour le Douglas, mais cette essence a été introduite très récemment en France par rapport au temps nécessaire à l'évolution du sol. Enfin, il faut aussi préciser que les observations sont classées par essence principale, et qu'elle n'est pas la seule présente sur la parcelle.

L'altitude a un rôle assez particulier dans cette analyse. En effet, elle est très fortement corrélée avec le climat. Lorsque les variables climatiques sont dans l'analyse, l'altitude n'est pas significative, alors qu'elle l'est en régression simple. Le consensus scientifique sur l'effet de la température et des précipitations (Burke *et al.* 1989, Kirschbaum 1995, Callesen *et al.* 2003, Sun *et al.* 2004) ainsi que les meilleurs résultats statistiques ont conduit à prendre les variables climatiques plutôt que l'altitude.

Enfin, la dernière variable dont il est intéressant de préciser la non significativité est la présence de traces humaines sur la parcelle. On aurait pu s'attendre au contraire, mais dans la base de données, cette variable a été recodée en ne tenant pas compte du type de trace humaine relevée par l'agent. Une analyse plus détaillée le prenant en compte pourrait les faire ressortir.

II.5 – Comparaison simulations / observations

L'objectif de ce chapitre est de sélectionner un modèle d'évolution du carbone du sol, puis de juger avec les données à disposition s'il est légitime de l'employer pour les besoins de l'étude.

La démarche suivie consiste à sélectionner dans la bibliographie le modèle semblant le mieux adapté, puis de mener une analyse de sensibilité très détaillée afin d'évaluer son comportement suivant les différents facteurs pouvant influencer le carbone du sol.

Par ailleurs, un modèle statique du carbone du sol est développé sur des données indépendantes, pour tracer les grandes tendances que les facteurs climatiques, pédologiques voire anthropiques peuvent exercer sur le carbone des couches minérales du sol. Les humus ne sont pas pris en compte afin de gommer les effets haute fréquence inhérents à cette fraction plus labile du sol.

Ainsi, la comparaison de l'analyse de sensibilité et des tendances du modèle statique doivent présenter une bonne cohérence pour autoriser l'emploi de *Century*.

Effet de la température

L'analyse de sensibilité aussi bien que le modèle statique révèlent l'importance majeure de la température sur les stocks de carbone. En effet, lorsque la température augmente, l'activité des microorganismes est stimulée et la décomposition accélérée, d'où une diminution du stock de carbone.

De plus, les températures mensuelles ne sont pas équivalentes dans l'année. Un calcul analytique de l'impact de la température lors de l'analyse de sensibilité a mis en évidence que les températures élevées ont un effet supérieur aux températures basses. Ainsi, l'analyse de sensibilité montre que pour le modèle *Century*, les températures estivales doivent être un meilleur indicateur que la température annuelle moyenne.

Dans le modèle statique, si les températures moyennes étaient significatives, leur remplacement par les températures du mois de juin a conduit à un meilleur coefficient de corrélation.

Century et le modèle statique sont alors parfaitement cohérents sur ce point.

Effet des précipitations

Dans le modèle *Century*, l'inhibition de la décomposition lorsque le sol subit une sécheresse est prise en compte par l'ajout d'un réducteur (cf. §A.II.2 – 4.). La variable rendant compte de la réduction due à la sécheresse est le rapport « précipitation / évapotranspiration potentielle ». Dans le modèle *Century*, la réduction ne commence à se produire qu'à partir de valeurs du ratio PPT/ETP inférieures à 0,8.

Dans les données à disposition, cela ne se produit que très rarement, et l'influence des sécheresses ne peut donc pas être mise en évidence par le modèle statique.

Il faut rappeler que les données climatiques correspondant à chacune des placettes des réseaux européen et RENECOFOR sont issues du modèle *Aurelhy* de Météo France, et donc basées sur des moyennes trentennales. Les épisodes de sécheresse ponctuels observables sur des données réelles n'y apparaissent donc pas, contrairement aux sécheresses chroniques. Ce problème est lié aux changements d'échelle de temps.

Le modèle *Century* permet de prendre en compte les sécheresses ponctuelles fortes, lorsque le rapport PPT/ETP est très faible, mais pas l'influence des précipitations annuelles, ce qui est probablement une lacune.

En revanche, le modèle statique met en évidence une influence forte des précipitations annuelles. Plus elles sont élevées, plus le stock de carbone est important.

Il faut néanmoins noter que les précipitations annuelles et les températures sont fortement corrélées. Elles sont également corrélées avec l'altitude : plus on monte en altitude, plus les précipitations annuelles sont fortes, et plus les températures sont fraîches.

Or les effets des précipitations et des températures sont opposés dans le modèle statique : le stock de carbone décroît avec les températures élevées et croît avec les fortes précipitations. En résumé, les stocks de carbone croissent lorsque l'altitude augmente.

Donc si le modèle *Century* ne prend pas en compte l'impact des précipitations sur le stock de carbone, il n'entre pas pour autant en contradiction avec les résultats du modèle statique qui prévoit des stocks élevés pour les basses températures.

Effet du peuplement de couverture

Le peuplement de couverture influe simultanément sur la quantité d'apports de carbone que reçoit le sol et sur le rapport lignine sur azote.

Aucun effet significatif de l'essence sur le stock de carbone n'a pu être extrait des données des réseaux européen et RENECOFOR, alors que le modèle *Century* prédit une relation proportionnelle entre la quantité d'apports et le stock de carbone, et un effet positif du rapport lignine sur azote.

Cependant, trois points troublent l'analyse. D'abord renseigner l'essence dans les données fixe à la fois l'apport de carbone et le rapport lignine sur azote, alors que les effets de ces deux variables sont souvent opposés. Par exemple, le Chêne est l'essence ayant les quantités de chutes de litière les plus importantes et le rapport lignine azote le plus faible.

Ensuite, les données du réseau RENECOFOR sont les plus favorables pour mettre en évidence ce type d'effet puisque les peuplements sont choisis et la plupart du temps sont des futaies régulières avec une essence principale. Mais même dans ce cas, cette essence représente rarement plus de 85 % du peuplement en surface terrière. Dans le cas du réseau européen, les placettes ne sont pas choisies, et les peuplements peuvent être beaucoup plus mélangés. L'essence de référence est celle dont le coefficient d'abondance dans le relevé floristique est le plus élevé dans la strate arborescente.

Les peuplements n'étant pas monospécifiques, il est difficile de conclure à un effet de l'essence sur le stock de carbone.

Enfin, le troisième point concerne l'historique du peuplement. En effet, l'essence de référence de la placette est celle observée au moment des relevés, mais a probablement beaucoup évolué au cours du temps.

En conclusion, il est assez peu surprenant de ne pas trouver d'effet de l'essence de couverture sur le stock de carbone dans les données des deux réseaux.

Effet de la texture du sol

La texture du sol dans les données statiques est traduite par la fraction de limons + argiles. Dans l'analyse de sensibilité aussi bien que dans le modèle statique, cette variable influence positivement le stock de carbone. Plus le sol est argileux ou limoneux, plus le stock de carbone sera élevé. A l'inverse, plus le sol est sableux, plus le stock de carbone sera faible.

Dans les deux cas, cette variable est significative (ou sensible), mais présente une influence moindre que les températures.

A l'exception des précipitations qui ne sont pas prises en compte, mais dont l'effet peut se confondre avec celui des températures, le comportement de *Century* suit les mêmes tendances que celles décrites par le modèle statique du carbone du sol.

Les précautions ont été prises pour que les situations soient comparables, avec en particulier la suppression des humus.

De plus, les valeurs estimées après obtention d'un équilibre avec le modèle *Century* sont très proches de celles du modèle statique (environ 110 t C / ha).

Dans ces conditions, bien que le modèle n'ait pas été validé statistiquement avec un jeu de données approprié (ce qu'il n'aurait pas été possible de faire dans le temps imparti), les résultats obtenus permettent de l'utiliser avec confiance pour la présente étude.

II.6 – Valeurs des apports de carbone par essence

Le modèle statique a été établi pour connaître les grandes tendances qui existent sur le carbone du sol et justifier l'utilisation du modèle *Century*. Les variables climatiques ont alors été préférées aux indications sur l'essence de couverture.

Cependant, les données des réseaux européen et RENECOFOR peuvent aussi être utilisées pour estimer de manière indirecte les valeurs d'apports de carbone au sol par le turnover racinaire, extrêmement délicates à mesurer.

II.6 – 1. Méthode

Si l'on fait l'hypothèse que les sols forestiers dans l'état actuel sont à l'équilibre, alors il suffit de calculer les apports annuels nécessaires en entrée du modèle *Century* à l'obtention de la valeur de stock observée pour connaître les apports par le turnover.

La complexité du modèle *Century* ne permet pas d'effectuer ce calcul directement, mais un algorithme dichotomique permet d'arriver au même résultat.

Pour mettre en œuvre cette méthode, une autre hypothèse doit être effectuée. Les apports au sol sont de deux types : les chutes de litière et le turnover racinaire. Le stock de carbone final dépend alors à la fois de ces deux sources. Il serait possible de considérer que l'apport par le turnover racinaire est la différence entre l'apport global nécessaire pour obtenir la valeur d'équilibre et l'apport par les chutes de litière calculées dans le paragraphe A.II.4 – 1., mais cette méthode multiplierait les risques d'erreur. Il est alors préféré de considérer que les parts d'apports par le turnover et les chutes de litières sont égales.

Les valeurs moyennes de stocks de carbone par essence doivent alors être évaluées, ainsi que les conditions climatiques et pédologiques.

II.6 – 2. Conditions moyennes par essence

Pour connaître les stocks de carbone moyens par essence à l'échelle nationale, il est préférable d'utiliser les observations du réseau européen qui sont systématiques par rapport à celles du réseau RENECOFOR qui sont sur des peuplements sélectionnés. Ce choix est appliqué aux couches minérales du sol (entre 0 et 60 cm).

Cependant, en ce qui concerne les humus, les observations du réseau européen sont trop lacunaires et celle de RENECOFOR sont alors quand même utilisées.

Les valeurs de stocks de carbone par essences pour les couches minérales et les humus sont données dans le tableau A17.

On observe dans ce tableau que les valeurs des stocks dans les humus sont supérieures pour les résineux que pour les feuillus, ce qui traduit la décomposition plus lente des aiguilles que des feuilles. Cependant, les écart-types sont très élevés, ce qui traduit la grande dispersion des données. Ceux-ci sont du même ordre de grandeur que ceux de Nys (2001).

	<i>Chênes (sessiles et pédonculés)</i>	<i>Douglas</i>	<i>Hêtre</i>	<i>Tous Pins (hors maritime)</i>
<i>Stock des couches minérales (données réseau européen)</i>	80,7 tC/ha	90,2 tC/ha	117,3 tC/ha	84,8 tC/ha
<i>Ecart-type</i>	42,0 tC/ha	50,8 tC/ha	116,4 tC/ha	46,3 tC/ha
<i>Humus (données RENECOFOR)</i>	5,2 tC/ha	8,6 tC/ha	5,4 tC/ha	15,9 tC/ha
<i>Ecart-type</i>	4,1 tC/ha	4,1 tC/ha	2,5 tC/ha	9,3 tC/ha
<i>Total</i>	85,9 tC/ha	98,8 tC/ha	122,7 tC/ha	100,7 tC/ha

Tableau A17 : Valeurs des stocks de carbone pour les couches minérales et les humus par essence

Les conditions climatiques sont aussi différentes suivant les essences. De nouveau, les moyennes sont calculées à partir des points d'observation du réseau européen (figures A36 a), b) et c)).

On remarque sur ces figures que les températures moyennes pour les Chênes (sessile et pédonculé) et les Pins (toutes essences hors Pin maritime) sont plus élevées que les deux autres essences, et que leurs précipitations sont plus faibles. Cela traduit leurs positions en moyenne moins élevées en altitude.

Enfin, la texture du sol est également moyennée par essence (tableau A18).

	<i>Chênes (sessiles et pédonculés)</i>	<i>Douglas</i>	<i>Hêtre</i>	<i>Tous Pins (hors maritime)</i>
<i>% de limon + argile</i>	55,5 %	42,2 %	67,3 %	63,2 %

*Tableau A18 : Moyenne des textures par essence
(Calculées à partir des données du réseau européen)*

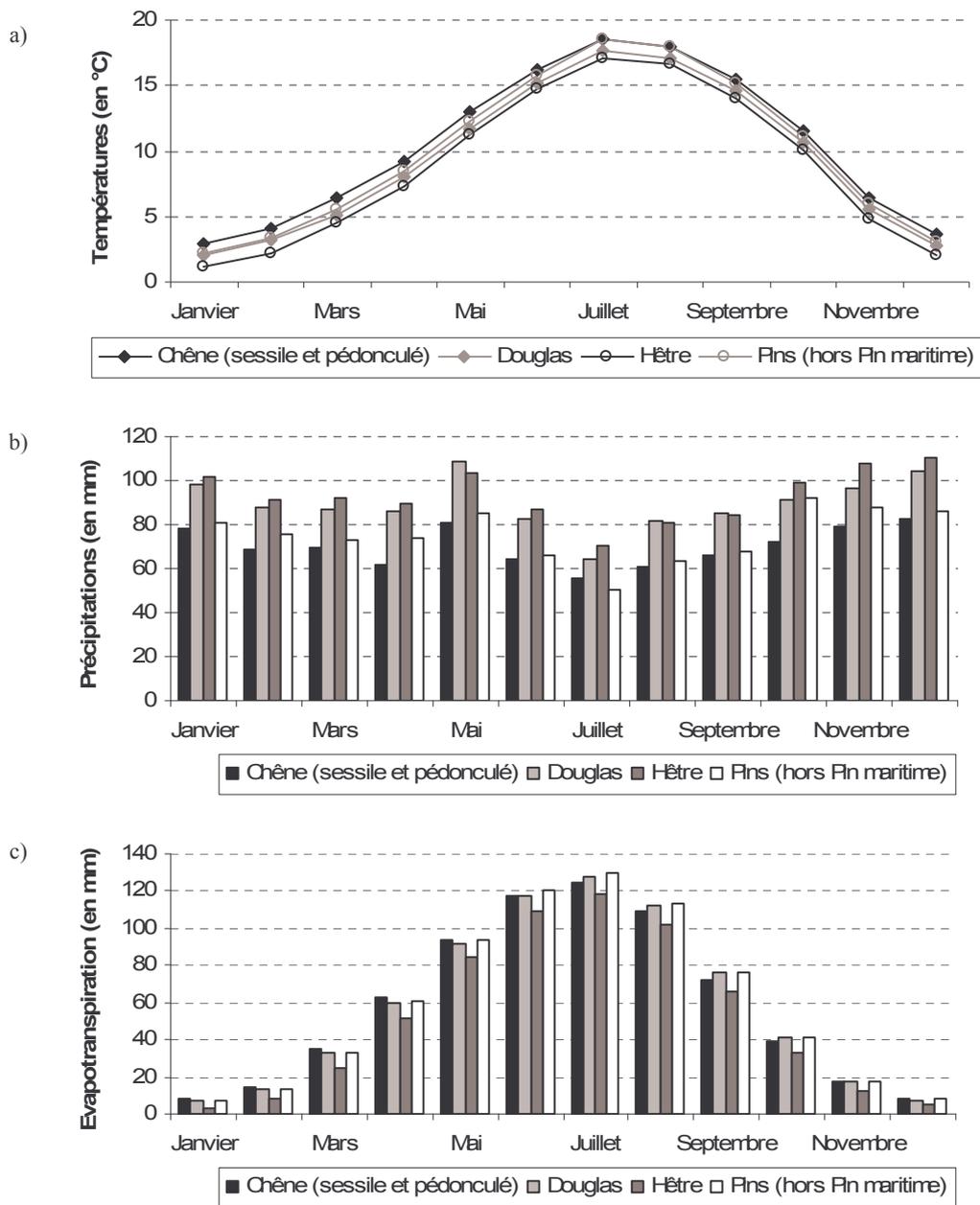


Figure A36 : Conditions climatiques moyennes par essence (données réseau européen)
a) Températures, b) Précipitations, c) Evapotranspirations

II.6 – 3. Résultats

Avec les hypothèses et conditions décrites ci-dessus, les valeurs d'apports de carbone nécessaires pour obtenir les stocks moyens par essence après obtention du régime permanent dans les simulations avec *Century* sont données dans le tableau A19. Rappelons que ces valeurs sont la somme du turnover racinaire et des chutes de litière.

	<i>Chênes (sessiles et pédonculés)</i>	<i>Douglas</i>	<i>Hêtre</i>	<i>Tous Pins (hors maritime)</i>
<i>Valeurs des apports annuels</i>	3,900 tC/ha/an	5,062 tC/ha/an	4,312 tC/ha/an	3,456 tC/ha/an

Tableau A19 : Apports annuels de carbone nécessaires pour obtenir les stocks moyens

Dans le cas du Chêne et du Hêtre, les valeurs sont cohérentes avec les chutes de litières observées avec le réseau RENECOFOR (cf. §A.II.4 : chutes de 4,97 tMS/ha/an pour le Chêne, et 4,22 tMS/ha/an pour le Hêtre). Rappelons que le taux de carbone dans la matière sèche est d'environ 50%. La valeur des apports un peu plus élevée pour le Hêtre que pour le Chêne est compensée par les conditions climatiques, puisque le climat moyen pour le Chêne est un peu plus chaud, ce qui facilite la décomposition.

Le cas des Pins est également cohérent avec les chutes de litière observées, puisqu'on obtient une valeur légèrement inférieure à celle du Chêne, pour des conditions climatiques et pédologiques à peu près égales, et que les chutes de litière pour le Pin étaient estimées à 4,21 tMS/ha/an.

En revanche, la valeur élevée pour le Douglas ne s'explique pas seulement avec le climat et les facteurs pédologiques. Les chutes de litière, qui étaient estimées à 2,37 tMS/ha/an, sont probablement sous-évaluées. On gardera plutôt la valeur de ce paragraphe.

II.7 – Conclusion du chapitre

Ce chapitre présente les données et les méthodes utilisées pour la modélisation concernant le volet « sol » de l'étude.

Les résultats que l'on peut en déduire concernant les stocks pour les différentes stratégies sylvicoles étudiées seront présentés dans la partie B consacrée à l'évaluation des stocks sur l'ensemble de la filière.

Dans ce chapitre sont présentés :

- les résultats d'un modèle de chutes de feuilles pour 6 essences : Chêne sessile, Hêtre, Douglas, Pin laricio, Sapin et Epicéa. Les proportions de feuilles et de branches dans les chutes sont également précisées.
- Une analyse de sensibilité détaillée du modèle *Century*, permettant de tracer les tendances du modèle avec les variables d'entrée.
- Un modèle statique du carbone des couches minérales du sol, dont les facteurs principaux sont climatiques, puis pédologiques.

La mise en relation des résultats de ces différents points a permis de légitimer l'utilisation du modèle *Century* pour cette étude, à savoir l'évaluation de l'impact qu'exercerait 1) une capitalisation sur pied des peuplements forestiers, 2) la substitution d'essences lentes par des essences à croissance rapide.

D'autre part, les valeurs d'apports annuels de carbone pour les différentes essences (chutes de litière et turnover racinaire) ont été calculées indirectement à partir des valeurs moyennes des stocks de carbone dans les sols et les humus des réseaux européen et RENECOFOR.

L'estimation du carbone du sol est extrêmement délicate. En effet, les valeurs de stocks de la matière organique du sol dans les couches minérales comme dans les humus sont très dispersées et le modèle statique établi dans le paragraphe A.II.4, en faisant intervenir quatre variables (températures, précipitations, texture du sol et la longitude) n'explique qu'une part très réduite de la variance.

Trois facteurs importants peuvent expliquer en partie la variance résiduelle :

D'abord, les données des réseaux européen et RENECOFOR sont nombreuses, mais leur acquisition très délicate et peu précise quand il s'agit de recalculer les stocks. En particulier, l'estimation des densités apparentes est très sensible à la manière d'effectuer l'opération, en particulier pour les couches les plus profondes.

Ensuite, les variables utilisées pour expliquer les valeurs des stocks peuvent également être mises en cause. L'utilisation de données climatiques basées sur des moyennes trentennales permet d'estimer les tendances à moyen terme, mais ne permet pas de traduire les accidents climatiques à des échelles de temps fines qui sont également influentes sur les stocks de carbone. L'essence de couverture est également une variable synthétique qui donne une indication sur les apports de carbone au sol, mais cette variable est discrète, alors que les peuplements sont rarement monospécifiques.

Enfin, la source d'incertitude majeure réside en la connaissance de l'histoire du sol considéré, qui est très influente sur les stocks actuels (Post *et al.* 2001). En effet, les analyses sont menées en considérant que les peuplements observés sont à l'équilibre. Cette hypothèse est très forte, puisque suite à la déprise agricole la part des forêts française est en constante augmentation (Koerner *et al.* 1999, Koerner *et al.* 2000, Pignard 2000). De plus, les dates des dernières éclaircies des peuplements ne sont pas connues, alors qu'elles perturbent très fortement les sols (Covington 1981, Johnson et Curtis 2001, Yanai *et al.* 2003).

Le carbone des sols forestiers est très variable même pour des forêts homogènes (Smith *et al.* 2004), et les bases de données permettant de les estimer à une grande échelle sont très peu nombreuses (Heath *et al.* 2002). Dans le cadre français, l'existence des deux grandes bases de données – le réseau Européen (Badeau 1998) et le réseau RENECOFOR (Ponette *et al.* 1997) – sont des apports considérables, même lorsque les précisions sont faibles.

Il résulte alors de ce chapitre que lors des simulations pour l'étude des deux stratégies sylvicoles, nous utiliserons des valeurs forfaitaires par essences pour les apports aériens et souterrains, que ceux-ci ne dépendent pas de la sylviculture, et qu'ils incluent les rémanents de coupes et la décomposition des bois-morts. La décomposition d'arbres entiers est exclue par les scénarios choisis.

III – Produits forestiers

Une large partie du déstockage du carbone accumulé dans les peuplements forestiers s'effectue lors des éclaircies, puis lors de la coupe finale. Une fraction est laissée sur le terrain sous forme de rémanents, mais la plus grande part est exportée de la forêt soit pour l'approvisionnement de l'industrie du bois, soit pour l'autoconsommation des ménages.

Les rémanents, déjà considérés dans les entrées forfaitaires du modèle sol, deviennent de la nécromasse qui s'incorpore au sol sous l'action des décomposeurs, et constituent encore un stockage sous forme de matière organique. Ce point est traité dans le chapitre précédent.

La partie exportée de la forêt va être transformée, utilisée pendant un certain nombre d'années, parfois recyclée. Le carbone retournera alors fatalement à l'atmosphère soit par combustion, soit par décomposition. Entre temps, il contribue encore au stockage sous la forme de produits forestiers. Cette contribution sera plus ou moins importante suivant la longévité du produit.

Les choix sylvicoles influent donc également sur le stock de carbone par les produits forestiers qu'ils engendrent. Par exemple, une gestion permettant de produire de grandes quantités de bois de construction, soit par le choix des essences, soit par le choix des diamètres d'exploitabilité, sera plus bénéfique au stockage qu'une autre alimentant essentiellement la filière papier-carton. La prise en compte de ce compartiment est alors essentielle.

Une des difficultés du volet « produits forestiers » tient au positionnement qu'il faut adopter. Faut-il se placer du point de vue du gestionnaire forestier qui produit des grumes ou de celui du négociateur à Kyoto qui raisonne en termes de stocks dans les produits finis ? Quelle est l'échelle à laquelle on se place : celle de la parcelle, du massif forestier, ou bien de la ressource nationale ? Les résultats sont très dépendants de ce positionnement, et n'auraient que peu de sens sans expliciter clairement ces choix.

L'objectif de cette étude est d'estimer l'impact de choix sylvicoles sur le stock de carbone à l'échelle de la parcelle. Le problème est alors appréhendé d'amont en aval : quelle sera la durée de vie de l'ensemble du bois de la grume produite, y compris les pertes dues à la transformation et le recyclage. D'autre part, les questions économiques ne sont pas considérées, et une modification de l'offre due à une sylviculture différente est considérée entièrement absorbée par le marché. Il est intéressant que l'aspect économique soit découplé de ce travail pour pouvoir répondre uniquement à la question des stocks de carbone en lien avec la sylviculture.

Le chapitre est organisé en trois parties : la première où les filières bois dans lesquelles les produits sont répartis sont présentées et leurs espérances de vies calculées, et les deuxième et troisième sont consacrées respectivement aux répartitions des feuillus (Chêne sessile et Hêtre) et des résineux (Douglas et Pin laricio) dans ces filières.

III.1 – Les filières bois

III.1 – 1. Principes généraux

Des travaux précédents ont déjà été menés sur l'analyse de la filière bois. En particulier, un rapport du CTBA à l'ADEME dans le cadre du programme GICC (Paquet et Deroubaix 2003) décrit la répartition en 5 sous-filières qui sera également adoptée ici, à savoir les filières construction, ameublement, emballage, papier-carton et bois énergie. Ce rapport est d'autant plus intéressant qu'il est adapté au marché français. Il donne également de précieuses informations sur les durées de passage dans les différentes étapes de la transformation en industrie, et sur les durées de vie moyennes en utilisation finale.

D'autre part, la thèse de Selmani (1992) fournit une multitude de coefficients de rendement lors des différentes phases de transformation du bois en industrie.

L'utilisation conjointe des rendements de Selmani et de l'analyse des filières du rapport CTBA permet de retracer des cycles de vie des produits et de calculer ce que nous appellerons des « durées de vie apparentes ». Ces durées de vie correspondent à l'espérance de vie d'une quantité de bois qui entre dans la filière, et non une durée de vie du produit fini. Cette approche est plus pertinente dans le cadre de l'étude car l'ensemble de la grume doit être considérée. L'exemple simple suivant permet d'explicitier la notion : si un produit fini a une espérance de vie de 15 ans, mais que 60 % de la grume ayant servi à le construire est perdue en chutes ayant une durée de vie de deux ans, alors la durée de vie apparente sera :

$$\text{durée de vie apparente} = 40\% \times 15 \text{ ans} + 60\% \times 2 \text{ ans} = 7,2 \text{ ans}$$

Il s'ensuit que les durées de vies apparentes recalculées ainsi peuvent paraître très courtes lorsque dans les esprits les produits forestiers sont associés aux meubles massifs ou autres usages du bois beaucoup plus longévifs.

Le recyclage doit également être estimé. Une solution simple est adoptée : après utilisation finale, les produits sont systématiquement intégrés dans les filières papier-carton ou bois énergie. Il en est de même pour les pertes lors des transformations qui sont recyclées dans ces deux filières. Cependant, dans le cas des filières emballage (palettes, caisses palettes...) et papier-carton, le recyclage prend une importance particulière et les traitements sont décrits dans les chapitres correspondants.

Enfin, une autre simplification est adoptée : lorsqu'un volume de bois est intégré dans une filière, il perd sa spécificité. L'information sur l'essence ou sur le diamètre du billon n'est pas conservée. Le lien avec la sylviculture est effectué en amont puisque la répartition des volumes entre les différentes filières dépend de l'essence et des diamètres.

III.1 – 2. La filière papier carton

Cette filière, de même que la filière bois énergie, ne nécessite pas la prise en compte des rendements matière. Un cycle simplifié, déduit du travail Saed Raji présenté dans le rapport CTBA (Paquet et Deroubaix 2003) est illustré figure A37.

La durée de vie sous forme de produits finis utilisée dans le rapport n'est pas indiquée, mais il est possible de la déduire des flux et des stocks chez les consommateurs finaux donnés pour les années 1990 et 1998 (tableau A20). Le stock étant le produit des flux entrant et sortant par la durée de vie, on en déduit qu'elle est égale à 12 mois.

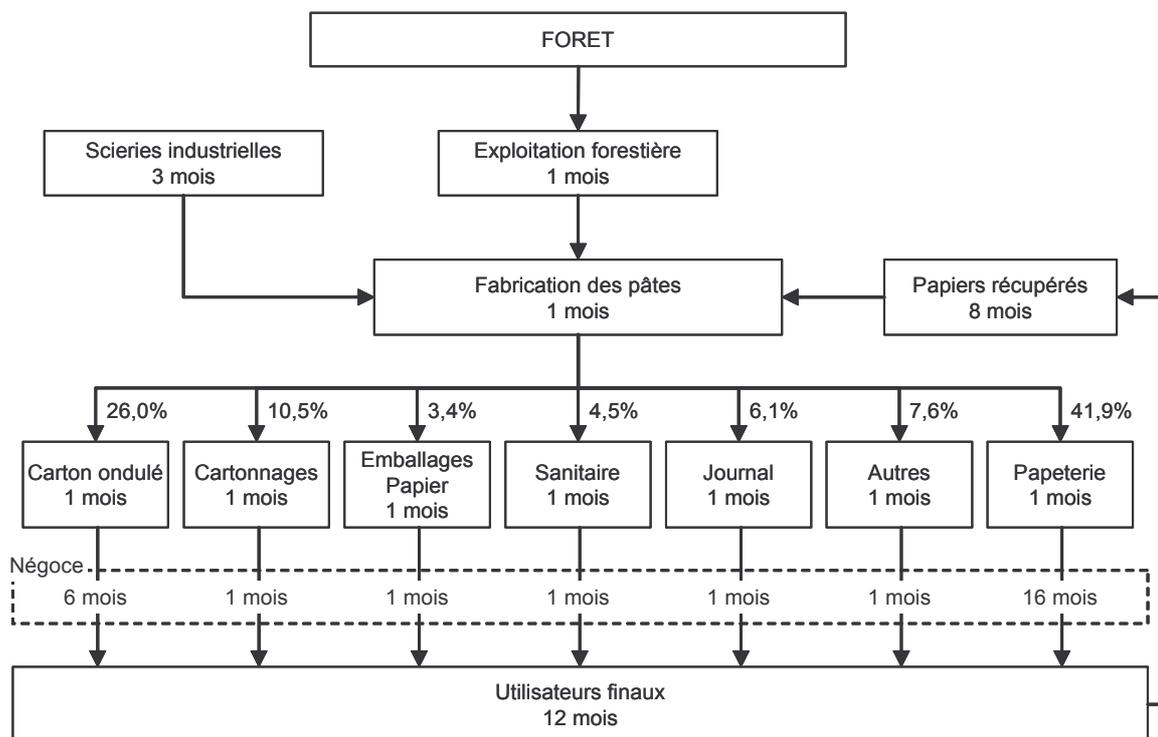


Figure A37 : Cycle de vie de la filière papier-carton.
Cycle inspiré de Raji, dans Paquet et Deroubaix (2003), Selmani (1992) pour les rendements.

	1990	1998
Stocks		
consommateurs finaux	10,53	11,91
Flux annuels		
Carton ondulé	+ 3,44	+ 4,74
Cartonnages	+ 1,25	+ 2,05
Emballages en papier	+ 0,38	+ 0,68
Papier à usage sanitaire	+ 0,60	+ 0,81
Papeterie	+ 6,54	+ 6,62
Journaux	+ 1,05	+ 1,32
Autres	+ 1,64	+ 0,26
Recyclage	- 5,19	- 7,99

Tableau A20 : Données de stocks et de flux annuels vers et depuis les consommateurs finaux en millions de tonnes d'équivalent CO₂.
Données du CTBA (Paquet et Deroubaix 2003)

Pour le calcul de la durée de vie apparente de la filière papier carton, il faut dans un premier temps considérer le calcul sans recyclage. D'autre part, les quantités restent plus longtemps en scierie qu'en exploitation forestière. On ne considérera que l'exploitation forestière, le temps passé dans les scieries étant compté dans les autres filières.

On obtient alors, hors recyclage, une durée de vie de 23,6 mois.

De plus, en analysant les flux entrant et sortant chez les consommateurs finaux, on note que 40% des produits sont recyclés. On considérera, comme dans le rapport de Paquet et Deroubaix (2003), que cette partie n'est recyclée qu'une seule fois. Dans le rapport CTBA, la durée de vie de ces quantités recyclées est égale à la durée de récupération entre les consommateurs finaux et les usines de pâte (8 mois), plus la moitié de la moyenne de stockage chez les consommateurs finaux (6 mois). La même démarche est adoptée ici ce qui donne une durée supplémentaire de 14 mois à appliquer à 40% des produits finaux. Ainsi, la durée de vie apparente de l'ensemble de la filière papier-carton est de 29,2 mois.

Remarquons, pour comparaison, que si l'on choisissait un nombre de recyclages infinis, on obtiendrait une durée de vie de 32,9 mois. La différence est minime.

III.1 – 3. La filière bois énergie

La filière bois énergie est extrêmement complexe, en raison de la multitude des intervenants, et surtout de la grande opacité des transactions. En effet, une faible partie de la filière bois énergie fait l'objet de transactions marchandes, et les données statistiques en sont d'autant plus rares et imprécises (Paquet et Deroubaix 2003).

Le rapport CTBA consacre un large chapitre détaillant l'ensemble de la filière. Tous les intervenants sont pris en compte : les petites et grandes chaufferies, les charbonniers, l'autoconsommation des ménages et des industries, les délais de livraison qui dépendent des sous-secteurs, les stocks chez les conditionneurs etc...

L'analyse de tout ce cycle a été effectuée par les auteurs, qui estiment pour l'ensemble de la filière bois énergie une durée de stockage moyenne de 1 an et 8 mois (20 mois). Cette valeur ne sera pas remise en cause dans notre étude.

III.1 – 4. La filière construction

Le bois dans la construction est un des plus longévifs. Cette filière regroupe la charpente et la couverture, dans les domaines industriels et particuliers, mais aussi l'utilisation en menuiseries extérieures et en agencement. Une catégorie « autres » est constituée par des produits à durée de vie courte comme le bois de chantier utilisé en coffrages ou échafaudages, ainsi que des produits à durée de vie plus longue comme les étalements ou les traverses de chemin de fer.

Le schéma de la filière avec les rendements, les pourcentages de répartition et les durées de vies à chaque phase (figure A38) sont synthétisés depuis la thèse de Selmani (1992) et le rapport CTBA à l'ADEME (Paquet et Deroubaix 2003).

D'autre part, la durée de vie apparente doit prendre en compte le recyclage. Il est assez délicat de savoir ce que deviennent les produits après leur utilisation. On considérera que l'ensemble du bois perdu lors des deux transformations ainsi qu'après utilisation finale sera incorporé soit dans la filière bois énergie, soit dans la filière papier carton. Ces deux filières ayant des durées de vie apparentes proches (respectivement 20 mois et 29,2 mois), la durée de vie sera prise intermédiaire entre les deux, arbitrairement 24 mois, soit deux ans.

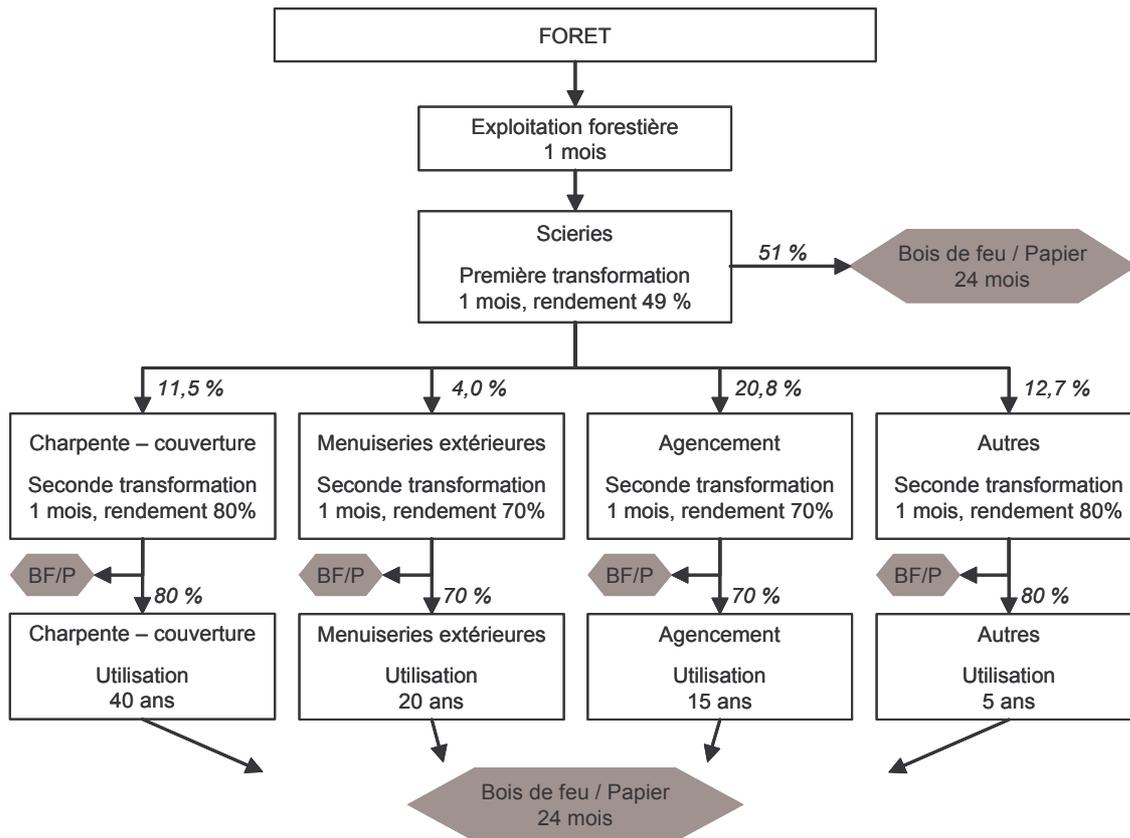


Figure A38 : Cycle de vie de la filière construction
Cycle inspiré de Raji, dans Paquet et Deroubaix (2003), Selmani (1992) pour les rendements.

Le calcul de la durée de vie apparente de l'ensemble de la filière en prenant en compte les rendements de fabrication mais pas la réutilisation des produits finis en bois de feu ou en pâte à papier se fait de la manière suivante :

Volume perdu après la première transformation :

- 51% du volume est écarté après passage en exploitation puis scieries : 2 mois

Volume perdu après la seconde transformation :

- $11,5\% \times 20\%$, correspondant aux pertes dans le secteur « charpente - couverture » a une durée de vie totale de 3 mois
- $4,0\% \times 30\%$, correspondant aux pertes dans le secteur « menuiseries extérieures » a une durée de vie totale de 3 mois
- $20,8\% \times 30\%$, correspondant aux pertes dans le secteur « agencement » a une durée de vie totale de 3 mois
- $12,7\% \times 20\%$, correspondant aux pertes dans le secteur « autres » a une durée de vie totale de 3 mois

Volume dans les produits finis

- $11,5\% \times 80\%$ en charpente - couverture : 483 mois
- $4,0\% \times 70\%$ en menuiseries extérieures : 243 mois
- $20,8\% \times 70\%$ pour l'agencement : 183 mois
- $12,7\% \times 80\%$ pour les autres produits : 63 mois

On obtient alors une durée de vie apparente hors recyclage de 85,6 mois. Pour prendre en compte le recyclage, il suffit alors d'ajouter 24 mois à toutes les sorties du cycle, ou bien 24 mois à la moyenne finale.

La durée de vie apparente de l'ensemble de la filière est alors de 109,6 mois, soit 9,1 ans.

III.1 – 5. La filière ameublement

La filière ameublement comporte beaucoup de sous-secteurs : les meubles fonctionnels (mobilier pour bureaux et magasins), les meubles de cuisine, les meubles meublant (armoires, commodes, lits, tables, rangements...), les sièges, la literie (fabrication de lattes et de cadres de sommiers) et les meubles extérieurs (figure A39).

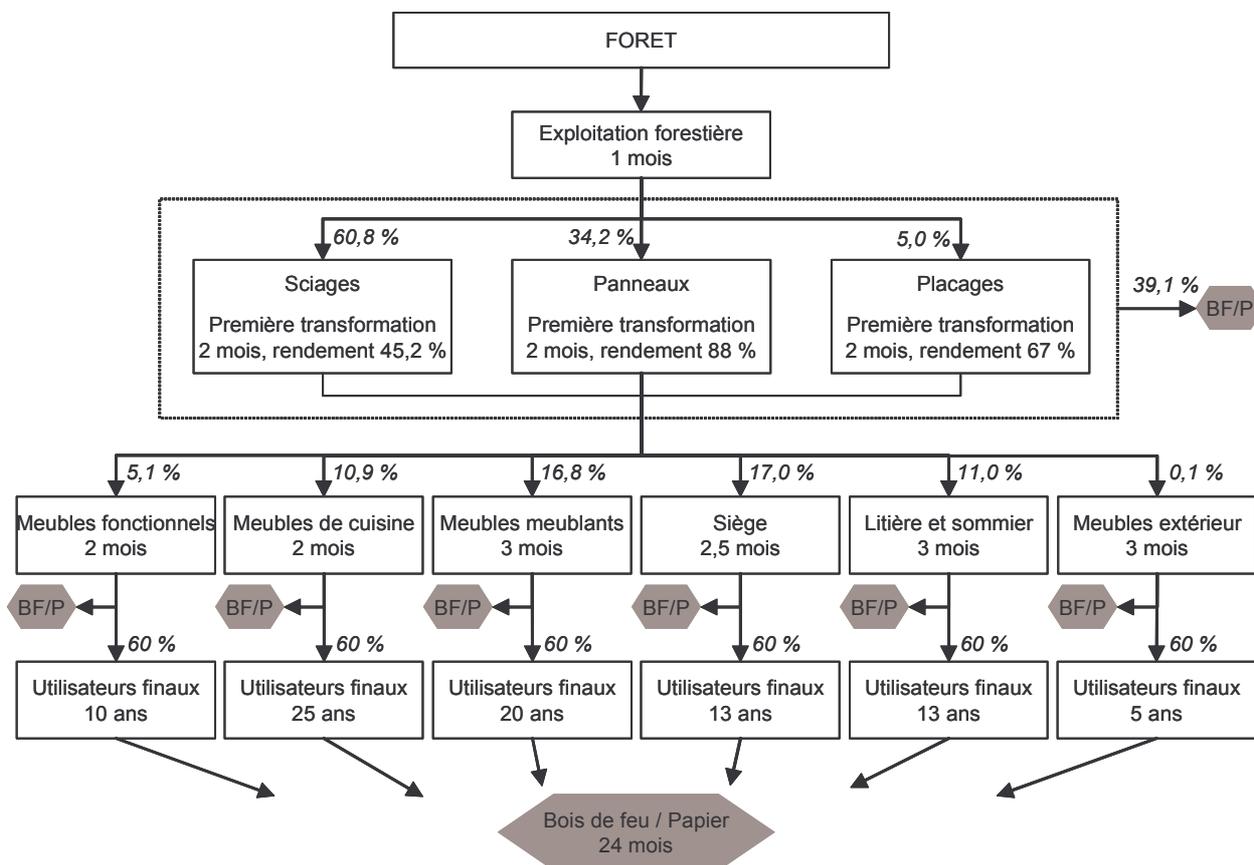


Figure A39 : Cycle de vie de la filière ameublement
Cycle inspiré de Raji, dans Paquet et Deroubaix (2003), Selmani (1992) pour les rendements.

De même que dans le cas de la filière construction, le recyclage est pris en compte en supposant que toute la matière finira à terme en bois de feu pour la filière bois énergie, ou bien en défibrage pour la filière papier carton.

Le calcul de la durée de vie est d'abord fait sans prendre en compte le recyclage, puis la durée de 24 mois correspondant à un intermédiaire entre la durée de vie du bois de feu et celle de la filière papier carton sera ajoutée à l'ensemble comme dans le cas de la filière construction.

L'analyse de ce cycle donne :

Première transformation :

- 39,1% en moyenne est écarté après la première transformation en sciages, panneaux et placages : 3 mois

Deuxième transformation :

- $5,1\% \times 40\%$ perdus après la seconde transformation pour les meubles fonctionnels : 5 mois

- 10,9% × 40% perdus après la seconde transformation pour les meubles de cuisine : 5 mois
- 16,8% × 40% perdus après la seconde transformation pour les meubles meublants : 6 mois
- 17,0% × 40% perdus après la seconde transformation pour les sièges: 5,5 mois
- 11,0% × 40% perdus après la seconde transformation pour la literie : 6 mois
- 0,1% × 40% perdus après la seconde transformation pour les meubles extérieurs : 6 mois

Utilisateurs finaux

- 5,1% × 60% utilisation des meubles fonctionnels : 125 mois
- 10,9% × 60% utilisation des meubles de cuisine : 305 mois
- 16,8% × 60% utilisation des meubles meublants : 246 mois
- 17,0% × 60% utilisation des sièges : 161,5 mois
- 11,0% × 60% utilisation de la literie : 162 mois
- 0,1% × 60% utilisation des meubles extérieurs : 66 mois

La durée de vie moyenne hors recyclage de l'ensemble est alors de 78 mois. Lorsqu'on ajoute les 24 mois représentant le recyclage, on obtient une durée de vie apparente de l'ensemble de la filière ameublement de 102 mois, soit 8,5 ans.

III.1 – 6. La filière emballage

Enfin, la cinquième et dernière filière correspond à tous les produits d'emballage bois. Il s'agit des emballages lourds (palettes, caisses palettes), des emballages légers (cageots) et des emballages sur mesure (figure A40).

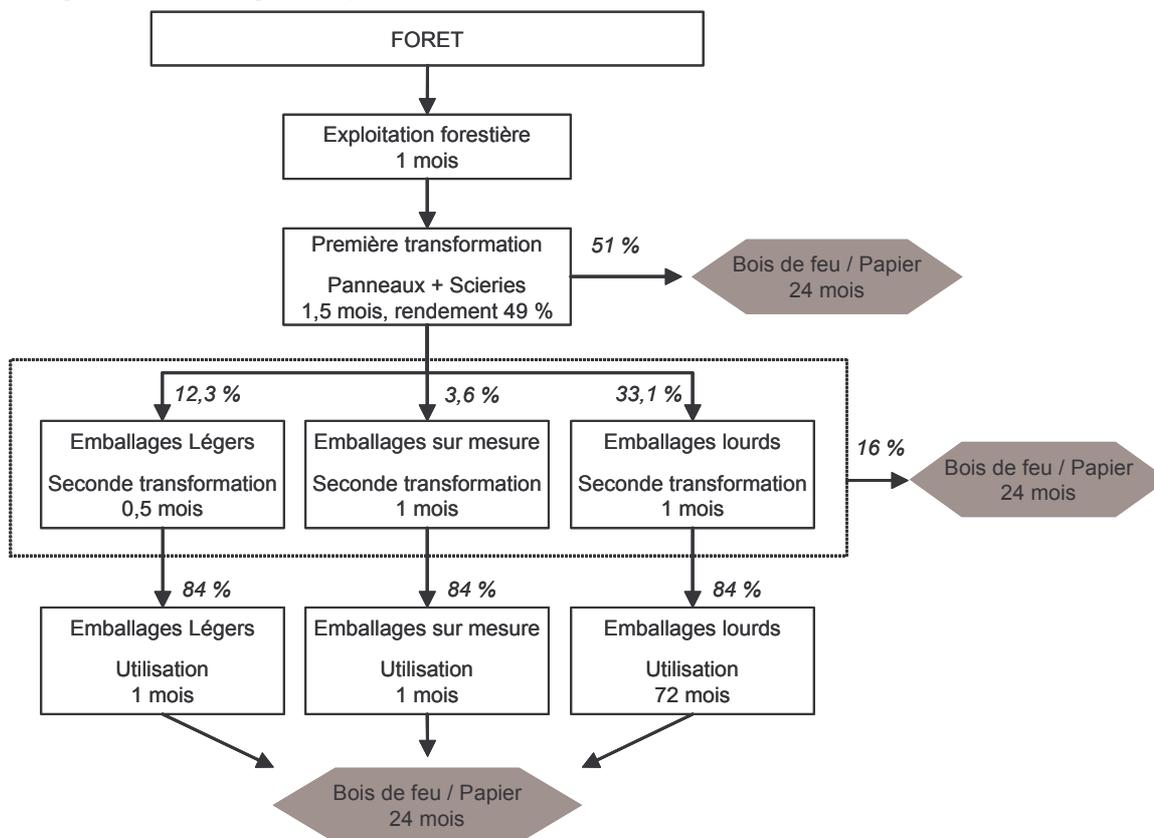


Figure A40 : Cycle de vie de la filière emballage
Cycle inspiré de Raji, dans Paquet et Deroubaix (2003), Selmani (1992) pour les rendements.

Le même style de calcul que pour les autres filières est effectué et permet d'aboutir à des durées de vie moyennes hors recyclage de 23 mois, et donc une durée de vie apparente de l'ensemble de 47 mois, soit 3,9 ans recyclage inclus.

III.1 – 7. Bilan de durée de vie par filière

Le tableau A21 dresse le bilan des durées de vie apparentes par filière.

<i>Bois énergie</i>	<i>Papier / cartons</i>	<i>Emballage</i>	<i>Construction</i>	<i>Ameublement</i>
20 mois	26 mois	3,9 ans	9,1 ans	8,5 ans

Tableau A21 : Durées de vie apparentes par filières

Dans les simulations qui seront effectuées, les filières bois énergie et papier / cartons, ayant des durées de vie très proches, seront confondues. La durée de vie apparente pour cet ensemble est prise à 2 ans.

III.1 – 8. Lois de durée de vie

Les durées de vies apparentes calculées dans les paragraphes ci-dessus sont des moyennes. L'utilisation d'une loi de durée de vie permet de renseigner la répartition temporelle des pertes.

La loi de Weibull, dont la loi exponentielle est un cas particulier, est très appropriée au problème. C'est une loi très utilisée en fiabilité des matériels, permettant de donner des fonctions de survie. En choisissant convenablement le paramétrage, cette loi est probablement préférable à la loi exponentielle dont la diminution maximale est au tout début. Au contraire, la loi de Weibull, avec un paramétrage adéquat, présente dans un premier temps une diminution faible, qui devient plus forte aux alentours de l'espérance de vie (figure A41). Par exemple, dans le cas des bois de structure, il est probable que les plus grandes pertes ne sont pas juste après la construction. C'est du moins à espérer...

Cependant, les informations disponibles relatives aux durées de vies sont uniquement des moyennes (ou espérances), et rien n'est donné sur les variances. Les quelques calculs théoriques ci-après permettent d'indiquer comment utiliser les variances avec cette loi si l'information est un jour correctement estimée.

Le développement mathématique n'est pas détaillé dans ce chapitre mais dans l'annexe II. On a les résultats suivants (recalculés à partir de la définition de Saporta (1990)) :

Fonction de répartition de la loi de Weibull :

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x^\beta}$$

Densité de la fonction :

La densité de la fonction est la dérivée de la fonction de répartition, donc on obtient

$$f(x) = \lambda \beta x^{\beta-1} e^{-\lambda x^\beta}$$

Espérance de la loi de Weibull :

$$E(X) = \frac{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})}{\lambda^{\frac{1}{\beta}}}$$

où Γ est la fonction gamma.

Variance de la loi de Weibull :

$$V(X) = \frac{\Gamma(1 + \frac{2}{\beta}) - [\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})]^2}{\lambda^{\frac{2}{\beta}}}$$

Comme il a déjà été indiqué avant dans ce paragraphe, les seules indications concernant les durées de vie des produits sont les espérances, et non les variances. On peut imaginer que les moyennes et les écart-types sont proportionnels. En effet, il est très probable qu'un produit ayant une moyenne de durée de vie de 20 ans ait un écart-type bien plus grand qu'un autre de durée d'une vie moyenne de 2 ans.

Si l'on suppose que les écart-types sont proportionnels aux moyennes, on a

$$\sqrt{V(X)} = \varphi E(X)$$

ce qui donne

$$\varphi = \frac{\left(\Gamma(1 + \frac{2}{\beta}) - [\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})]^2\right)^{\frac{1}{2}}}{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})}$$

On remarque alors que le coefficient de proportionnalité ne dépend pas du paramètre λ . La forme de la loi de Weibull est entièrement déterminée par la connaissance du paramètre β . La figure A41 montre les taux de survies en utilisant la loi de Weibull avec pour paramètres $\beta = 2$, $\beta = 3$ et $\beta = 4$, ce qui implique des écart-types respectifs de 59%, 36% et 28% de la durée de vie.

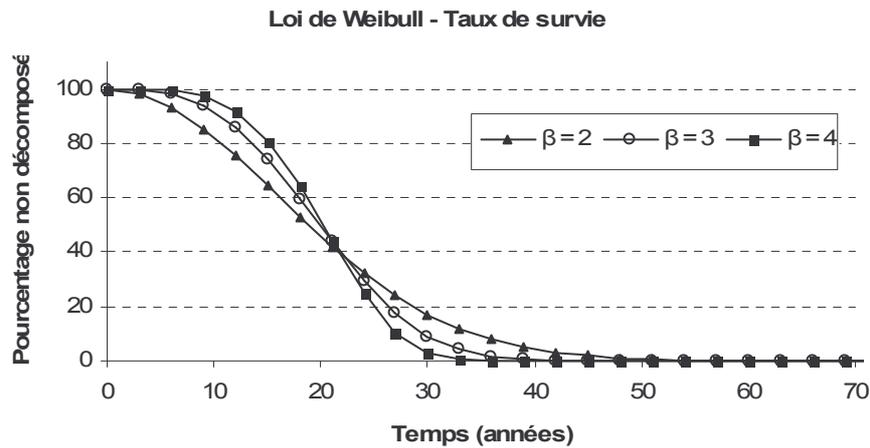


Figure A41 : Exemple de taux de survie avec la loi de Weibull avec pour paramètres $\beta = 2$, $\beta = 3$ et $\beta = 4$ pour une espérance de 20 ans

Pour les simulations qui seront effectuées, le stock moyen annuel de carbone ne dépend pas de la variance, mais uniquement de la durée de vie moyenne. En revanche, si l'on s'intéresse au régime transitoire, il faudrait connaître cette variance pour mieux estimer la vitesse à laquelle le carbone des produits forestiers retourne à l'atmosphère.

Cependant, même dans le cas du régime transitoire, cette variable n'est pas très sensible, par rapport aux absorptions de carbone par le peuplement forestier en particulier. Le paramètre β sera pris égal à 2 pour les simulations. Cela permet d'avoir des retours à l'atmosphère plus étalés dans le temps.

D'autre part, pour être plus correct, ces lois de Weibull devraient s'appliquer à chacune des étapes de la transformation du bois. Pour une étude à un pas de temps fin des retours à l'atmosphère, l'opération est tout à fait réalisable avec la description précise des filières données plus haut. Cependant, pour l'objectif de l'étude, ce pas de temps très fin n'est pas nécessaire, et il est raisonnable d'appliquer ces lois de Weibull à l'ensemble de la filière, pour laquelle on utilisera la durée de vie apparente moyenne.

III.2 – La répartition en produits pour les feuillus

Les simulations pour les feuillus sont effectuées avec Fagacées, implémenté dans l'environnement CAPSIS (de Coligny *et al.* 2003). Tous les arbres sont individualisés, et il est possible à chaque pas de simulation de connaître les caractéristiques dendrométriques (circonférence, hauteur totale, hauteur de base de houppier) de chacun des individus.

Le volume aérien des arbres est séparé en trois compartiments : le volume bois fort de la tige, le volume bois fort des branches (sections supérieures à 7 cm de diamètre), et le volume des menus bois (branches et rameaux inférieurs à 7 cm de diamètre). Dans les simulations, seuls la tige et le bois fort des branches sont exportés en produits forestiers. Les menus bois sont considérés restant sur le terrain. Le volume bois fort total est estimé à l'aide des tarifs de cubage bois fort total (tige + branches) de Bouchon (1974, 1982). D'autre part, le volume de la tige seule est estimé à l'aide de profils de tiges. Le volume bois fort branches est alors la différence entre les deux.

Un travail d'optimisation de répartition des billons de Chêne sessile en différents types de produits forestiers a été effectué par Bucket (2005). Ce type d'approche n'est pas utilisé ici pour deux raisons : i) les méthodes d'optimisation sont beaucoup trop coûteuses en temps de simulation pour être effectuées dans ce type d'étude, ii) nous avons préféré adopter une répartition effective en produits forestiers plutôt qu'une optimisation pour rendre compte des pratiques actuelles.

III.2 – 1. Cas du Chêne sessile

Dans le cas du Chêne sessile comme celui du Hêtre, un profil de tige est utilisé afin de billonner les tiges des individus, et pour ensuite répartir les billons dans les cinq filières des produits forestiers.

III.2 – 1.1. Profil de tige

Un profil de tige a déjà été développé pour le Chêne sessile (Dhôte *et al.* 2000b), et implémenté dans le simulateur Fagacées au cours de la thèse (figure A42). Il définit la forme de la tige jusqu'à la base de houppier en prenant en compte l'empatement, et une diminution linéaire est appliquée entre la base de houppier et le bourgeon terminal.

III.2 – 1.2. Répartition dans les filières de produits forestiers

Le profil de tige étant connu, les arbres récoltés sont débités en billons de 2 mètres de longueur, correspondant à la valeur minimale donnée dans un rapport interne de Flammarion (1986) du Laboratoire d'Economie Forestière de Nancy.

Ensuite, le diamètre milieu du billon est calculé grâce au profil de tige, et le billon est alors réparti suivant les différentes catégories données dans le tableau A22 issu du rapport de Flammarion (1986). Notons tout de même que dans cette répartition, la filière merrain, bien que valorisant bien le bois, n'est pas indiquée. Normandin (1990) donne un graphique des utilisations du bois de Chêne indiquant que seulement 1,6 % des bois d'œuvre français sont affecté à la fabrication de merrains. Cette absence n'est alors pas primordiale.

Les pourcentages donnés dans ce tableau correspondent à l'ensemble de la ressource, et ne devraient pas être applicables à un individu dans un peuplement donné. Cependant, à défaut d'informations plus précises, on utilisera quand même des pourcentages individuels au prorata des pourcentages de la ressource nationale, même si ce n'est pas entièrement correct. Par exemple, un billon de 45 cm de diamètre milieu aura la répartition suivante entre les compartiments : 7,4% en B1, 18,5% en B2, 27,8% en C1, 27,8% en C2 et 18,5% en T.

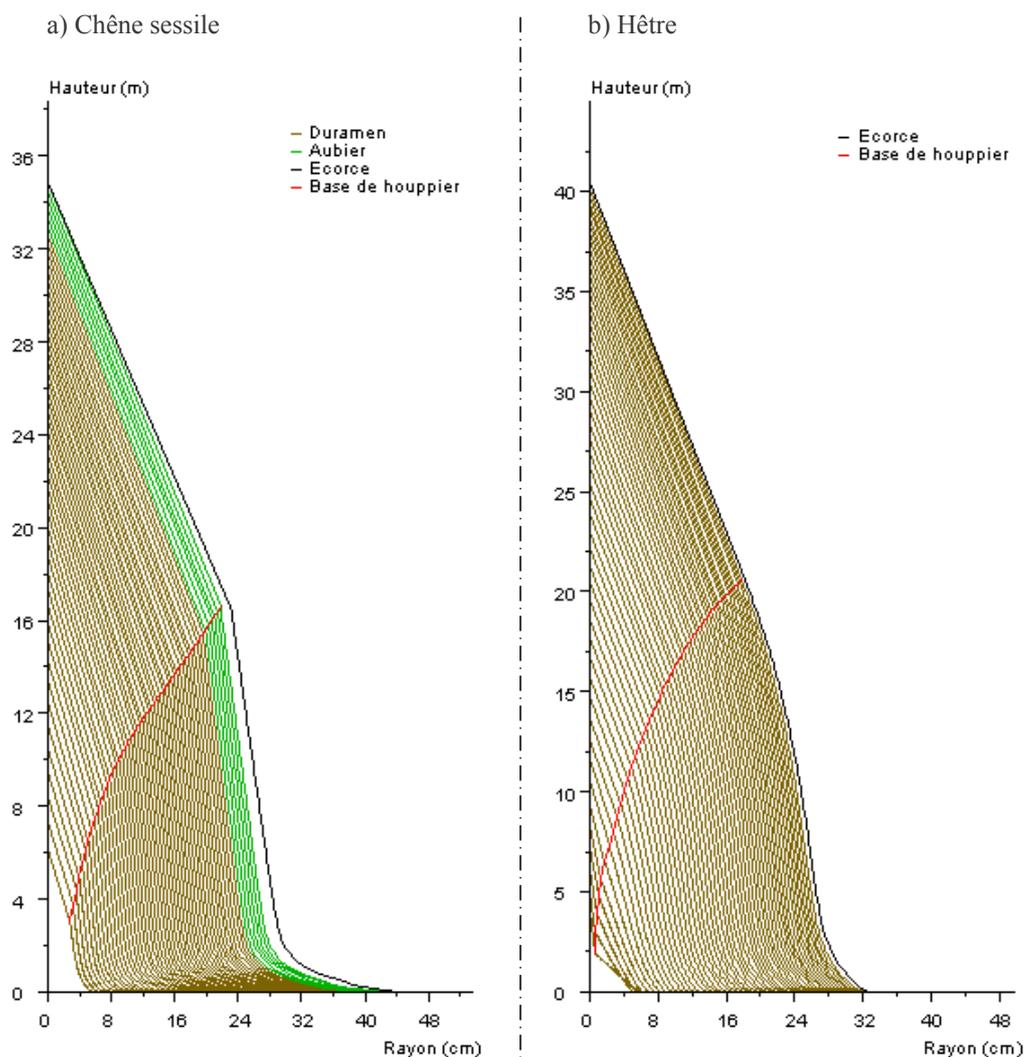


Figure A42 : Exemples de profils de tige obtenus avec Fagacées pour
a) un chêne sessile, b) un hêtre

Diamètre du billon (cm)	%	70 - 79	60 - 69	50 - 59	40 - 49	30 - 39	20 - 29	10 - 19
A : Tranchage	1	X	X	X				
B1 : Ebénisterie	4		X	X	X			
B2 : Menuiserie fine	10			X	X	X		
C1 : Menuiserie ordinaire	15			X	X	X		
C2 : Charpente parquet	15				X	X	X	
T : Traverse / ossature	10				X	X		
Bois de feu / pâte à papier	45						X	X

Tableau A22 : Répartition des billons dans les différents types de produits suivant le diamètre milieu du billon de 2 mètres pour le Chêne sessile
Les pourcentages donnés correspondent à l'ensemble de la ressource

D'autre part, les types de produits du tableau A22 ne correspondent pas aux cinq filières décrites dans le paragraphe A.III.1. Les répartitions suivantes sont alors choisies :

- Tranchage : filière ameublement
- Ebénisterie : filière ameublement
- Menuiserie fine : filière ameublement
- Menuiserie ordinaire : filière ameublement
- Charpente / parquet : filière construction
- Traverse / ossature : filière construction
- Bois de feu / pâte à papier : filière bois énergie ou pâte à papier

Pour les filières bois de feu et pâte à papier, la même position que précédemment sera adoptée : on groupera les deux filières en prenant une durée de vie intermédiaire de 2 ans.

Enfin, le volume ainsi défini ne correspond qu'à la somme de tous les billons de deux mètres possibles pour l'ensemble des arbres récoltés. Le reliquat de la tige ainsi que tout le volume bois fort des branches est affecté au bois énergie où à la filière papier-carton.

III.2 – 2. Cas du Hêtre

La démarche pour le Hêtre est rigoureusement identique à celle du Chêne sessile. En revanche, aucun profil de tige spécifique n'a été développé au laboratoire. Une recherche bibliographique ainsi qu'une modélisation ont été nécessaires.

III.2 – 2.1. Profil de tige

Le seul profil de tige pour le Hêtre trouvé dans la bibliographie a été développé par Trincado et Gadow (1996), sur un échantillon de 774 individus adultes en Allemagne. Les variables d'entrée sont la circonférence à 1,30 m, la hauteur de base de houppier et la circonférence à la base du houppier. Pour pouvoir l'utiliser, il a donc été nécessaire de les estimer avec les variables de sortie de Fagacées, à savoir la circonférence et la hauteur totale.

Ce profil ne décrit que la grume, et il est complété par un cône dans le houppier, de la même manière que celui du Chêne sessile.

III.2 – 2.1.1 Données disponibles

Trois jeux de données ont permis de résoudre ce problème. Les deux premiers ont été utilisés pour élaborer un modèle de hauteur de base de houppier, et le troisième pour estimer la circonférence à la hauteur de base de houppier. Ces jeux de données sont les suivants :

- « Route de Frouard » :

Il s'agit d'un jeu provenant d'une étude sur le rendement des houppiers (Pouderoux *et al.* 2001) contenant 1584 mesures. Le dispositif, situé dans la forêt de Haye près de Nancy, a été installé en 1976 pour suivre l'effet des éclaircies sur les houppiers des hêtres. Les caractéristiques stationnelles sont décrites par Pouderoux *et al.* (2001). Les données proviennent de 6 parcelles, dans lesquelles sont mesurés 40 ou 80 arbres selon les parcelles. Ces arbres ont été mesurés en 1976, 1981, 1987, 1992 et 1997, ce sont donc des mesures répétées. Les âges des arbres au moment des observations vont de 35 ans à 111 ans. Les fertilités des placettes sont de 28 m à 100 ans (une parcelle), 30 m à 100 ans (3 parcelles) et 34 m à 100 ans (2 parcelles).

- « Darney » :

De nouveau, l'objectif de ce dispositif est d'estimer l'évolution de houppiers d'arbres d'avenir. La forêt de Darney est également située en Lorraine, mais dans les Vosges, non loin d'Épinal. Il s'agit d'un double clinal, avec 11 niveaux d'éclaircies variant continûment. Les arbres ont été mesurés à trois dates : 1979, 1987 et 1996. Les données ne sont pas encore publiées.

Ces deux peuplements constituent une très grosse base de données (1879 observations), mais ce sont des mesures répétées qui ne peuvent donc pas être considérées indépendantes, et seront traitées de manière adéquate. L'histogramme des circonférences et des hauteurs est montré figure A43.

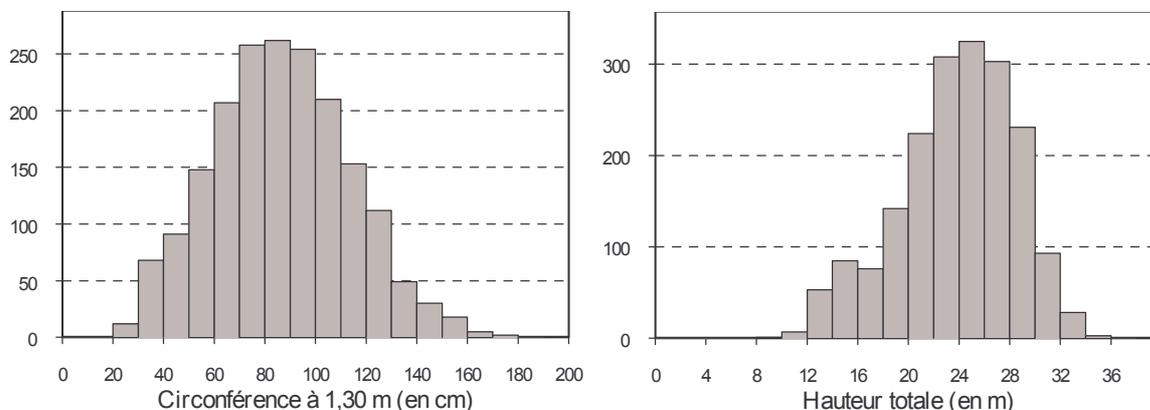


Figure A43 : Histogrammes des circonférences et des hauteurs des arbres de « Route de Frouard » et « Darney »

- « Cubage hêtres » :

Le troisième jeu de données regroupe des arbres prélevés dans l'Orne et en Meurthe et Moselle vers le milieu du XX^{ième} siècle afin d'établir des tarifs de cubage. Il comporte 290 arbres dont le volume est estimé par billons d'un mètre en mesurant la circonférence du point milieu. Ces données permettent alors de connaître les circonférences à chaque niveau dans l'arbre. Elles seront utilisées pour estimer la circonférence à la base du houppier.

III.2 – 2.1.2 Modèle de hauteur de base de houppier

- Méthodes d'analyse

Il y a pour l'analyse de ce jeu de données un conflit entre ce qu'il est possible d'en déduire, et son utilité. En particulier, il serait intéressant d'utiliser comme variable explicative l'indice de densité RDI (Reineke 1933), certainement bon indicateur de la remontée de base de houppier. Cependant, les résultats seront utilisés afin d'estimer le diamètre à la base de houppier dans un jeu de données dans lequel le RDI n'est pas calculable par manque d'informations sur le peuplement. Cette variable sera alors malheureusement écartée. Il en sera de même pour toutes les variables de type « peuplement ». En fait, les deux seules variables utilisables sont la circonférence à 1,30 m (c_{130} en cm) et la hauteur totale (h_{Tot} en m) de l'arbre considéré.

La circonférence et la hauteur étant fortement corrélées, une transformation sera effectuée pour atteindre de meilleurs résultats statistiques. Une régression linéaire simple sur les transformations logarithmiques des deux variables donne un bon coefficient de détermination ($R^2 = 0,73$, cf. figure A44). La pente de la régression est égale à 0,52 ce qui conduit à utiliser la variable $c_{130}^{\frac{1}{2}} / h_{Tot}$, qui représente la robustesse de l'arbre et sera désormais notée *rob*. Plus *rob* est élevée, plus l'arbre est trapu. Inversement, plus *rob* est faible, plus l'arbre est élancé. Les variables c_{130} et *rob* ont une très faible corrélation (-0,05).

Le graphe des effectifs par classe de robustesse de la base de données est donné figure A45.

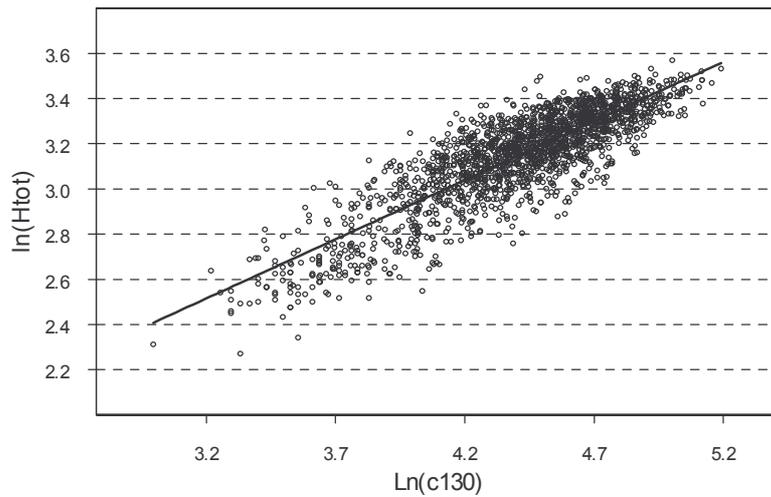


Figure A44 : Nuage de points $\ln(c_{130}) \times \ln(h_{Tot})$ pour les deux jeux de données

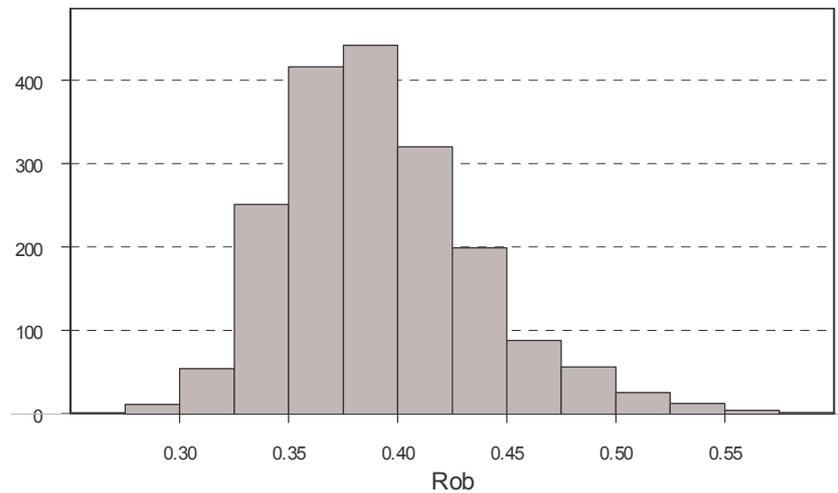


Figure A45 : Effectifs des robustesses de la base de données

Plutôt que de modéliser directement la hauteur de base du houppier (hauteur de la première branche vivante, notée h_{bh}), il est plus intéressant de travailler sur une transformation de celle-ci. Deux possibilités ont été envisagées : la première, non retenue finalement, est la hauteur relative de houppier (cr), qui varie par construction entre 0 et 1 :

$$cr = 1 - \frac{h_{bh}}{h_{Tot}} \quad [A16]$$

Cependant, la forme du nuage de points hauteur de base de houppier \times hauteur totale (Figure A46) incite à envisager plutôt un modèle de type « potentiel – réducteur ». Il apparaît très clairement sur ce graphique une droite maximale pour la hauteur du houppier que l'on définira comme le potentiel, tous les points du graphique étant situés en dessous.

La variable expliquée sera alors le réducteur plutôt que la hauteur relative de houppier, ce qui est au final très proche.

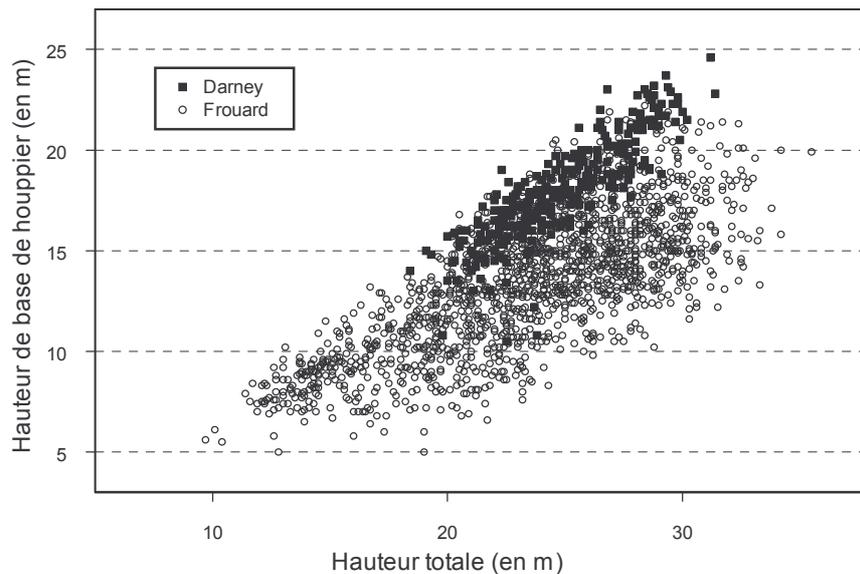


Figure A46 : Nuage de points hauteur totale \times hauteur de base de houppier

- **Estimation du potentiel**

Pour estimer le potentiel, au vu de la qualité de la droite recherchée, une méthode basique donne de bons résultats. Il s'agit simplement de grouper les données par classe de hauteur totale (choix arbitraire de 2m de largeur de classe), et de sélectionner les deux arbres ayant les valeurs de base de houppier maximales. Une régression linéaire simple sur les points sélectionnés donne

$$\text{Potentiel} = 0,888 \times h_{\text{Tot}} - 1,88 \quad [A17]$$

On définira alors le réducteur ainsi :

$$\text{Réducteur} = h_{\text{bh}} / \text{Potentiel} \quad [A18]$$

On remarque alors avec les équations [A16], [A17] et [A18] que modéliser la longueur relative de houppier ou le réducteur est un problème très similaire.

De plus, il est également très intéressant de remarquer que les potentiels des deux forêts sont extrêmement proches, ce qui conforte dans l'utilisation de méthodes simples pour estimer ce potentiel. Il serait intéressant de regarder sur d'autres jeux de données la constance de ce potentiel.

- **Estimation du réducteur**

Les données sont lacunaires dans la mesure où seulement deux jeux de données sont disponibles. De plus, les données ne sont pas indépendantes puisque ce sont des mesures répétées. Il est alors nécessaire d'utiliser des types de modèles appropriés.

Deux possibilités s'offrent alors : soit un modèle de type autocorrélation entre deux mesures successives, soit un modèle à effets aléatoires. Le second a été choisi car il donne de meilleurs résultats.

Ainsi, le type de modèle sélectionné est un modèle avec un effet aléatoire au niveau « arbre dans forêt » sur la constante. Dans un premier temps, l'effet aléatoire de la forêt sur la constante permet de prendre en compte un niveau global du réducteur différent pour chacune des deux forêts, mais sans l'explicitier, ce qui permettra de l'utiliser en extrapolation dans d'autres forêts. Ensuite, l'effet aléatoire « arbre dans forêt » permet d'appréhender le côté répété des mesures : si un arbre présentait un réducteur élevé lors de sa mesure en 1976, il est probable que ce soit également le cas lors des mesures suivantes. Un effet aléatoire au niveau arbre permet de fixer la constante du réducteur et ensuite de voir la dépendance avec les variables disponibles.

Enfin, la tendance du réducteur avec la circonférence (figure A47) a incité à utiliser un modèle non linéaire, avec une dépendance de type exponentielle décroissante. Outre le meilleur ajustement, une décroissance exponentielle lorsque la circonférence augmente présente l'avantage d'être une attitude plus prudente en extrapolation. En effet, une dépendance linéaire décroissante avec la circonférence aurait généré des valeurs très basses, voire négatives, lorsque la circonférence est très grande, alors qu'avec l'exponentielle, le terme correspondant à la circonférence tend vers zéro quand la circonférence augmente, et le réducteur tend alors vers la constante.

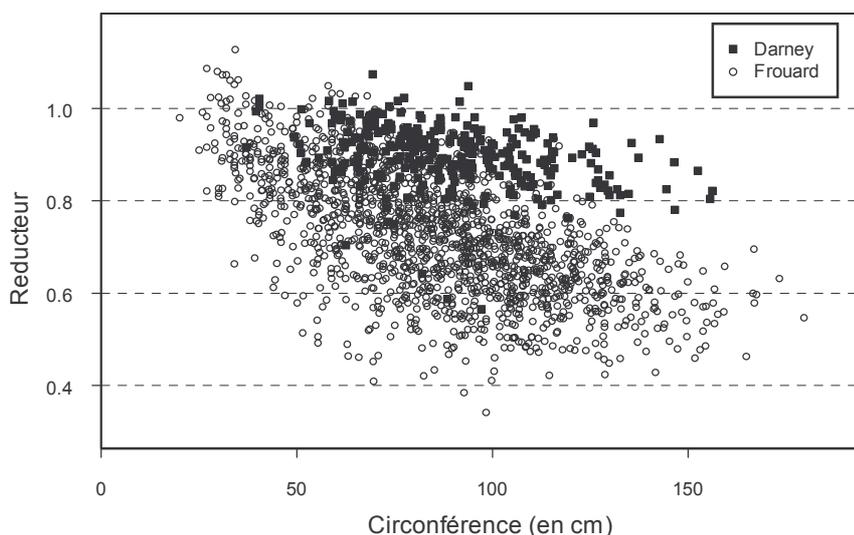


Figure A47 : Réducteur \times Circonférence pour les données de Darney et Frouard

Le modèle obtenu est alors

$$\text{Réducteur} = a + b \times \exp(-c \times c_{130}) + d \times rob \quad [A19]$$

Les statistiques des effets fixes et aléatoires de l'ajustement sont présentées tableaux A23 a) et A23 b). L'ajustement est réalisé par la méthode du maximum de vraisemblance sur 1879 observations.

Paramètre	Estimation	Ecart-type	$Pr(> t)$
a	0,618	0,077	$<10^{E-4}$
b	0,920	0,019	$<10^{E-4}$
c	0,0131	0,0011	$<10^{E-4}$
d	-0,288	0,069	$<10^{E-4}$

Tableau A23 a) : Statistiques des effets fixes de l'ajustement du modèle [A19]

Ecart-type de l'effet « Forêt »	0,093
Ecart-type de l'effet « Arbre dans forêt »	0,076
σ^2	0,0044

Tableau A23 b) : Statistiques des effets aléatoires de l'ajustement du modèle [A19]

Dans le modèle [A19], les effets de la circonférence et de la robustesse sont négatifs sur le réducteur. Ce résultat est réaliste puisqu'il signifie que plus un arbre est gros ou trapu, comme dans le cas des dominants ou des arbres dans des peuplements clairs, plus son houppier descend bas.

Enfin, rappelons que lorsque la circonférence tend vers les grandes valeurs, la partie exponentielle du modèle tend vers 0, ce qui limite l'influence sur le réducteur. De plus, la robustesse de l'arbre (variable *rob*) ne prend jamais des valeurs au dessus de 0,60, ce qui implique que même pour les plus grandes valeurs de circonférence, le réducteur ne descend jamais en dessous de 0,44 ce qui évite les valeurs aberrantes comme des réducteurs négatifs.

- **Modèle de circonférence à la base du houppier**

A l'aide du modèle de hauteur de base de houppier du paragraphe précédent il est possible d'estimer, dans un nouveau jeu de données indiquant les volumes d'arbres par billons d'un mètre, le billon où se trouve le début du houppier. Connaissant le volume, on peut estimer les circonférences des milieux des billons, et les interpoler pour obtenir celui de la base de houppier. Ce jeu de données comporte 290 arbres.

A titre indicatif, la figure A48 indique les résultats du modèle de hauteur de base de houppier appliqué à ce jeu de données.

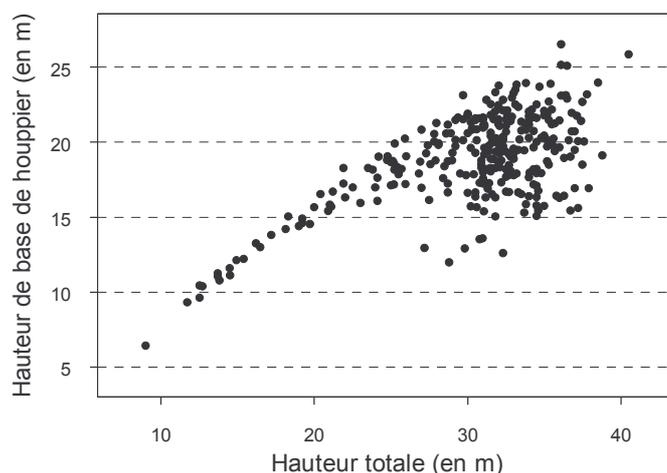


Figure A48 : Modèle de hauteur de base de houppier appliqué au troisième jeu de données

Les premiers essais sur la circonférence relative (rapport de la circonférence à la base du houppier sur la circonférence à 1,30 m) ainsi que sur un modèle de type « potentiel – réducteur » comme dans le paragraphe précédent sont infructueux, il a fallu se limiter à une régression sur la circonférence à la base de houppier.

Les données présentent de l'hétéroscédasticité qu'il a fallu prendre en compte. La structure de variance choisie est de type puissance, ce qui rend compte de son augmentation lorsque la circonférence augmente. Le meilleur modèle obtenu est la régression linéaire suivante (figure A49)

$$c_{bh} = -14,3 + 0,70 \times c_{130} \quad [A20]$$

où c_{bh} est la circonférence à la base de houppier et c_{130} la circonférence à 1,30 m. Les deux sont en centimètres.

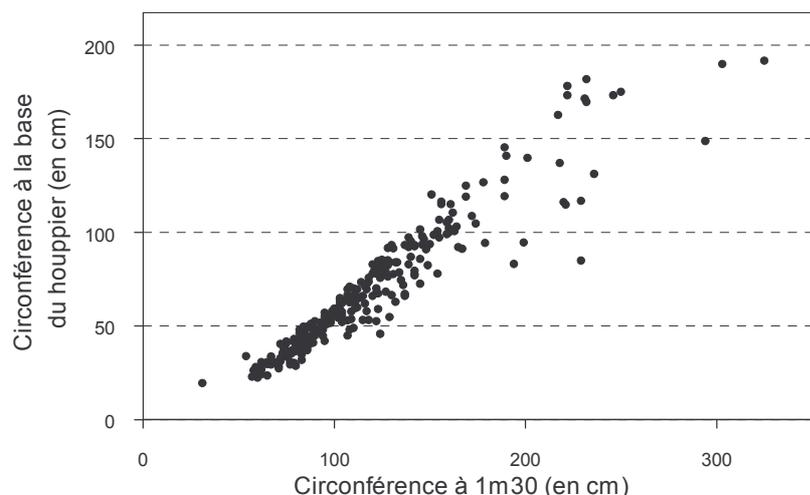


Figure A49 : Relation entre la circonférence à la base du houppier et la circonférence à 1,30 m

La relation [A20] est établie en estimant les circonférences sur un jeu de données grâce à la relation [A19]. Il est très fortement recommandé d'utiliser les deux simultanément : une modification de l'une des deux modifierait fortement la seconde.

- **Utilisation du profil de tige**

A l'aide des deux modèles développés ci-dessus, il est possible d'utiliser un profil de tige pour le Hêtre disponible dans la littérature et basé sur 774 arbres (Trincado et Gadow 1996). Ce modèle finissant la description du profil de la tige à la base du houppier, la partie haute sera la droite passant par les points (h_{bh}, c_{bh}) et $(h_{Tot}, 0)$.

On a donc

si $h < h_{bh}$

$$r_{(h)} = \frac{c_{bh}}{2\pi} + i + \left(\left(\frac{c_{1,3} - c_{bh}}{2\pi} \right) - i \right) \frac{e^{p(1,3-h)} - e^{p(1,3-h_{bh})}}{1 - e^{p(1,3-h_{bh})}} - i \frac{e^{q(h-h_{bh})} - e^{q(1,3-h_{bh})}}{1 - e^{q(1,3-h_{bh})}}$$

si $h \geq h_{bh}$

$$r_{(h)} = \frac{c_{bh}}{2\pi} \times \left(1 - \frac{h - h_{bh}}{h_{Tot} - h_{bh}} \right)$$

où h est la hauteur (en m) dans l'arbre, $r(h)$ est le rayon (en cm) à la hauteur h , c_{bh} est la circonférence (en cm) à la base du houppier, h_{bh} la hauteur (en m) de base du houppier et h_{Tot} la hauteur totale (en m) de l'arbre. i , p et q sont des paramètres donnés dans le tableau A24.

Paramètre	f	p	Q
valeur	0,128740	0,692141	0,085243

Tableau A24 : Paramètres pour l'utilisation du profil de tige du Hêtre (Trincado et Gadow 1996) ; $f = i / (c_{130} - c_{bh})$

A titre d'exemple, les figures A50 a) et b) indiquent que lorsque l'arbre présente de gros accidents (probablement une fourche) dans le profil, l'adéquation n'est pas très bonne, mais qu'en revanche, pour les arbres sans accident, le profil est bon. Les deux arbres choisis sont bien représentatifs de ces deux catégories.

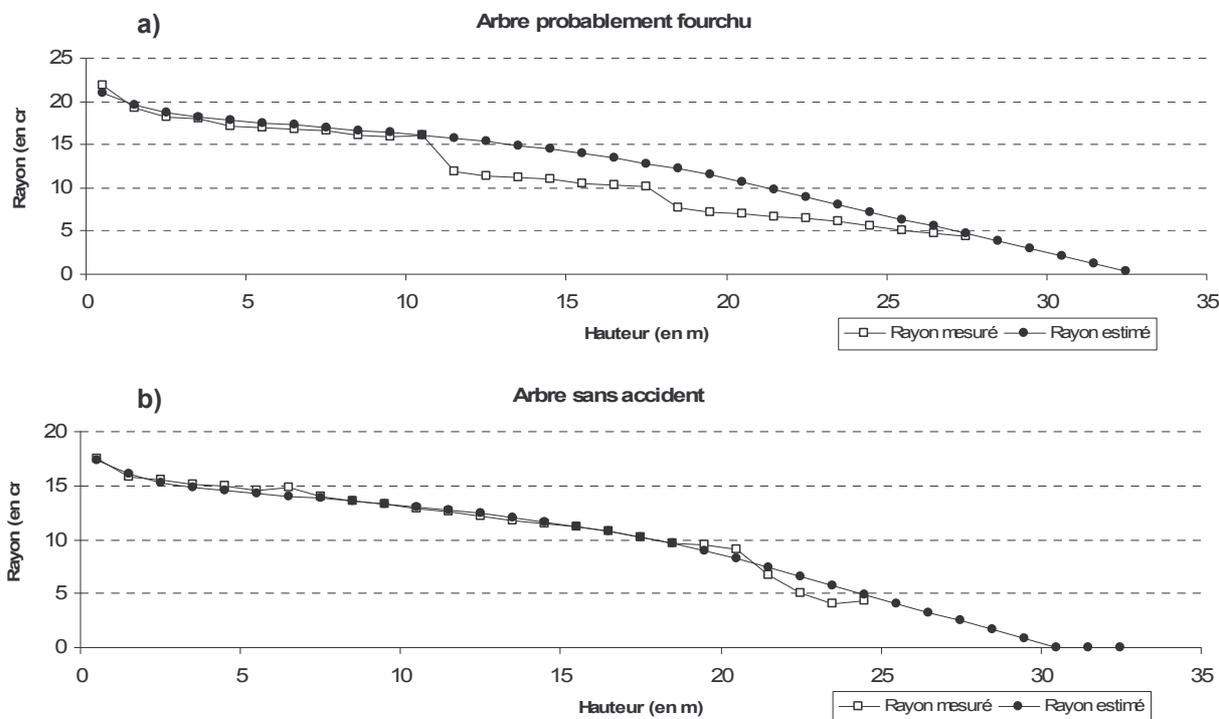


Figure A50 : Profils de tige estimés et mesurés pour
a) un hêtre probablement fourchu
b) un hêtre sans accident

Il ne serait pas très propre statistiquement de valider l'utilisation de ce profil de tige avec les jeux de données disponibles dans la mesure où ils ne sont pas indépendants, puisque ayant déjà été utilisés pour ajuster les modèles [A19] et [A20]. Néanmoins, une faible part de l'information des profils (troisième jeu de données) a été utilisée pour élaborer les modèles dans la mesure où seule la circonférence à la hauteur de base de houppier a été relevée. Le tracé des résidus pour l'ensemble de la tige constitue malgré tout une vérification intéressante.

Le graphique A51 montre les résidus des profils de l'ensemble des arbres de la base de données. Afin de pouvoir superposer tous les arbres, les hauteurs et les rayons sont relatifs : toutes les hauteurs sont divisées par la hauteur totale de l'arbre considéré, et tous les rayons sont divisés par le rayon à 1,30 m.

Ce graphique montre alors que l'empattement est systématiquement sous-estimé, ce qui n'est pas excessivement important. De plus, la mesure elle-même mériterait d'être plus précise que seule la circonférence au point milieu du billon pour cette partie de l'arbre.

Quelques arbres sont sur-estimés, il s'agit comme précisé plus haut des arbres fourchus ou ayant un accident.

Enfin, d'autres sont légèrement sous estimés dans la partie haute. Ceux là sont probablement des arbres dont la hauteur totale est la cause du problème, peut être ont-ils eu des bris de cime.

Globalement, ce graphe de résidus est convenable.

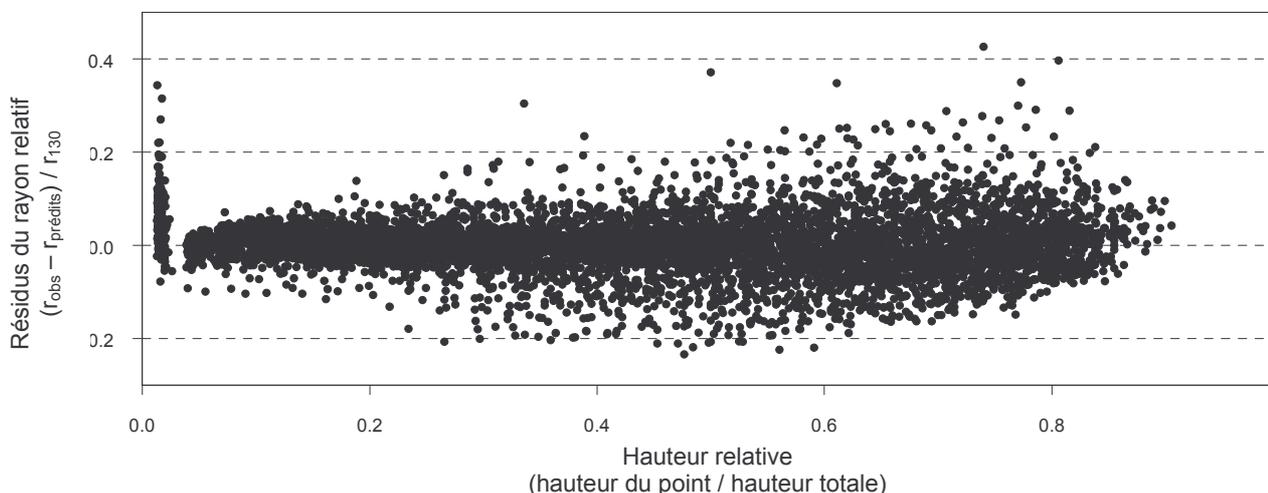


Figure A51 : Résidus du profil de tige superposés pour tous les arbres
Les rayons et les hauteurs ont été standardisés

Le profil de tige ainsi établi a été implémenté dans le simulateur Fagacées, et permet d'obtenir les résultats de la figure A42. L'écorce est fixée à 2,25% (valeur moyenne à 1,30 m pour 195 arbres du Nord Est de la France (données non publiées)). On observe sur cette figure que le profil n'est pas bon pour le très jeune âge, et mériterait de plus amples investigations. Cependant, pour la présente étude, ce problème n'est pas important puisque qu'il survient pour des diamètres pour lesquels il n'y a pas encore de bois fort, et où le bois n'est alors pas pris en compte dans les exportations. Passé ces jeunes âges, le profil semble visuellement très satisfaisant.

III.2 – 2.2. Répartition dans les filières de produits forestiers

La méthode pour la répartition des grumes de hêtres en produits forestiers est la même que pour le chêne sessile. On utilise le profil de tige pour débiter les grumes en billons, dont la longueur a été fixée à 4 mètres, pour correspondre aux pratiques. Ces billons sont ensuite répartis dans les différentes utilisations suivant le tableau A25 extrait de documents internes du Laboratoire d'Economie Forestière de Nancy (Flammarion 1986).

Diamètre	70 - 79	60 - 69	50 - 59	40 - 49	30 - 39	20 - 29	10 - 19
A : Tranchage	X	X	X				
B1 : Déroulage		X	X	X			
B2 : Ebénisterie		X	X				
C1 : Menuiserie			X	X			
C2 : Emballage					X	X	
Bois de feu / Papier							X

Tableau A25 : Répartition des billons dans les différents types de produits suivant le diamètre milieu du billon de 2 mètres pour le Hêtre

Ensuite, les différentes catégories approvisionnent les cinq grandes filières décrites précédemment de la manière suivante :

- Tranchage : filière ameublement
- Déroulage : filière ameublement
- Ebénisterie : filière ameublement
- Menuiserie : filière ameublement
- Emballage : filière emballage
- Bois de feu / Papier : filière bois énergie ou papier-carton

On peut faire le constat de l'agréable coïncidence suivante : les catégories du tableau A25 correspondent exactement aux limites des cinq grandes filières. Il n'est alors pas nécessaire de connaître les pourcentages de répartition au sein d'une même classe de diamètre. L'ensemble des billons de diamètre milieu supérieur à 40 cm est affecté à la filière ameublement, les billons de 20 cm à 40 cm de diamètre milieu à la filière emballage, et les billons inférieurs à 20 cm à la filière papier-carton ou bois énergie.

D'autre part, de même que pour le Chêne sessile, le volume bois fort des branches (partie des branches de section supérieure à 7 cm de diamètre) est comptabilisé par différence entre le volume bois fort total (tige + branches) donné par le tarif de Bouchon (Bouchon 1982) et le volume de la tige précédemment compté.

III.3 – La répartition en produits pour les résineux

La méthode dans le cas du Pin laricio et du Douglas est différente de celle des feuillus. Le simulateur « *WinEpiFn* » (Houllier *et al.* 1995) est conçu pour débiter en planches les grumes de plusieurs essences, dont le Douglas et le Pin laricio. Ces planches sont classées par qualité. *WinEpiFn* est alors parfaitement adapté au problème. Les simulations ont été effectuées grâce à l'aide de Jean-Michel Leban, concepteur du simulateur.

III.3 – 1. Cas du Pin laricio

Le couplage du simulateur de croissance *Pnl* (Meriedieu 1998) pour le Pin laricio et de *WinEpiFn* pour évaluer la transformation des grumes a déjà été effectué dans des études antérieures (Riou Nivert *et al.* 1999, Riou Nivert *et al.* 2001). Grâce à la très sympathique et efficace collaboration de Céline Meriedieu, il a été possible de profiter des acquis de ces travaux.

La version de *Pnl* implémentée dans CAPSIS 2.45 a été utilisée par simplicité. Le modèle de croissance est identique à la version CAPSIS 4, et le transfert de fichier à *WinEpiFn* est automatique.

Chaque éclaircie déclenchée dans le simulateur de croissance *Pnl* a généré des billonnages effectués par *WinEpiFn* avec les caractéristiques suivantes :

- La longueur des billons est de 3 mètres
- La hauteur de la souche est 50 cm
- Le diamètre fin bout est 10 cm

Pour le sciage des billons en planches, les options choisies dans *WinEpiFn* sont :

- Type de débit : standard (correspond au plan de débit des planches)
- Longueur des planches : 300 cm
- Largeur des planches : 20 cm
- Epaisseur des planches : 5 cm
- Trait de scie : 6 mm

- Pas de flaches sur les planches

D'autre part, le modèle de densité du Pin laricio comporte une partie aléatoire, qui n'est pas utilisée dans les simulations.

L'exploitation des fichiers de sortie est présentée partie B.II.

III.3 – 2. Cas du Douglas

Le cas est en pratique un peu plus complexe pour le Douglas que pour le Pin laricio, car il n'existe pas de couplage automatique entre *Simcop* et *WinEpiFn*. Il a alors été nécessaire de traiter les sorties de *Simcop* pour générer des fichiers textes compatibles avec *WinEpiFn*.

Les requis de *WinEpiFn* sont les suivants : 1 fichier est nécessaire pour chaque âge d'éclaircie, lequel comprend la liste de tous les arbres à billonner, pour lesquels doivent être connus : l'identifiant, l'âge, la circonférence sous écorce, l'épaisseur d'écorce (facultatif), la hauteur, la hauteur d'élagage (éventuellement), l'âge de l'arbre au moment de l'élagage (éventuellement), la hauteur de première branche morte, la hauteur de première branche verte, la hauteur du premier verticille vert, le nombre d'arbres représentés par l'individu, la surface dans la ressource représentée par cette placette.

Une partie de ces variables est directement accessible en sortie de *Simcop*. Cependant, il reste à estimer l'épaisseur d'écorce et les hauteurs autres que la hauteur totale.

Pour l'épaisseur d'écorce, un taux de 7% par rapport au diamètre sous écorce est appliqué. Cette valeur a été mesurée par Ottorini (*comm. pers.*) sur des données non publiées. Ce pourcentage est en accord avec les pourcentages en volume donnés par Décourt (1967b).

Pour les hauteurs de première branche vivante (première branche pour laquelle on observe encore quelques aiguilles), et de premier verticille vert (75% de la biomasse d'aiguille est encore présente), les observations de Mitchell (1975) seront suivies : le premier verticille vert (resp. la première branche vivante) est situé à trois unités de croissance (resp. cinq) en dessous du point de contact des houppiers. Le point de contact des houppiers est estimé à l'aide de la relation [A21].

$$CL = c \left(e^{(0,564 \times CC^{0,5}) / (b \times d)} - 1 \right) \quad [A21]$$

où CL est la longueur du houppier sans contact, CC la surface de projection du houppier (disponible en sortie de *Simcop*), et b , c , et d sont trois paramètres ($b = 11,59138$, $c = 20,10295$ et $d = 0,78581$).

On déduit de la hauteur totale et de CL la hauteur du contact, et il suffit alors de retrancher trois unités de croissance (resp. cinq) à partir de cette hauteur de contact pour obtenir la hauteur du premier verticille vert (resp. première branche vivante). Les fichiers de sortie d'inventaire au pas annuel dans *Simcop* permettent de retrouver ces valeurs pour l'individu concerné.

La hauteur de première branche morte est plus délicate à estimer. De nombreux facteurs peuvent la modifier. On considérera qu'un individu n'aura plus de branches en bas de la tige que dans le cas où il a subi un élagage artificiel. En pratique, on fixe à 1 mètre cette hauteur.

Le paramétrage du billonnage avec *WinEpiFn* est le suivant :

- La longueur des billons est de 3 mètres
- La hauteur de la souche est 50 cm
- Le diamètre fin bout est 10 cm

Pour le sciage des billons en planches, les options choisies dans *WinEpiFn* sont :

- Type de débit : standard (correspond au plan de débit des planches)
- Longueur des planches : 300 cm
- Largeur des planches : 10 cm
- Epaisseur des planches : 4 cm
- Trait de scie : 6 mm
- Pas de flaches sur les planches

III.3 – 3. Utilisation des sorties de *WinEpiFn*

III.3 – 3.1. Calcul des biomasses

Les sorties de *WinEpiFn* ainsi que leurs traitements sont identiques pour le Douglas et pour le Pin laricio. A chaque éclaircie un fichier de sorties de *WinEpiFn* est généré avec des informations sur les billonnages et sciages effectués.

Toutes les planches sciées suivant les critères choisis sont répertoriées et pour chacune sont connus en particulier les caractéristiques géométriques, l'infradensité et le classement visuel en catégories de choix (0A, 0B, 1, 2 ou 3A). Ces caractéristiques permettent d'obtenir à chaque éclaircie les volumes et les masses sèches de planches produites.

D'autre part, les volumes des billons sont également des sorties de *WinEpiFn*, ce qui permet par soustraction d'obtenir les volumes perdus lors de la première transformation. L'infradensité moyenne des planches de ce billon est appliquée à ces résidus pour en connaître la masse sèche.

Ainsi, les volumes et biomasses de l'ensemble de la partie billonnée de la tige sont connus pour tous les arbres. Dans le bilan des volumes, ne sont pas encore comptés le bois fort de la tige ne satisfaisant pas aux critères requis pour rentrer dans des billons, ainsi que le bois fort des branches.

Cette partie est estimée par différence avec le bois fort total. *Simcop* fournit les biomasses totales du peuplement avant et après éclaircie, on connaît donc la biomasse totale des arbres abattus. Le bois fort total en est déduit en inversant le facteur d'expansion branches (*FEB*) pour les résineux donné dans le rapport CARBOFOR (Loustau 2004) :

$$\text{Biomasse totale} = \text{FEB} \times \text{Biomasse bois fort}$$

avec *FEB* = 1,335 pour les résineux.

La partie bois fort n'étant pas entrée dans les billonnages est donc estimée par soustraction de la biomasse bois fort et de la biomasse des billons donnée par *WinEpiFn*. Cette approximation est assez grossière, mais ne porte que sur des quantités affectées aux filières papier-carton ou bois énergie qui ont des durées de vie assez courtes, ce qui en limite les implications.

III.3 – 3.2. Répartition dans les cinq filières

Le simulateur *WinEpiFn* donne un classement visuel des planches en catégorie de choix. Celles-ci doivent alors être réparties dans les cinq filières décrites dans le paragraphe A.III.1 ci-dessus.

Il n'existe pas dans la littérature d'études quantitatives sur la répartition des volumes par classe de qualité pour les résineux. Les laboratoires de recherches contactés n'ont pu fournir de réponse à ce sujet. Même des spécialistes du domaine tels que René Keller du Laboratoire d'Etudes

et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB) pensent que ce genre d'études n'a jamais été effectué, et que les données n'existent pas (*comm. pers.*). Ce travail pourrait être mené par enquête auprès de scieries, mais n'était pas réalisable dans le temps imparti pour la thèse. L'interrogation de quelques grandes scieries seulement générerait de forts biais et ne donnerait qu'une mauvaise représentation de la ressource nationale puisque celles-ci répondent à la demande de leurs clients avec la ressource qui leur est accessible.

Une approche pragmatique, basée sur deux documents à destination des professionnels a été adoptée. Le premier document est une plaquette (CTBA 1994) intitulée « Les Résineux Français » donnant des indications d'usage en fonction du classement des planches, élaborée par le CTBA avec le concours financier de l'ADEME et de Formabois, et avec la collaboration de la FNB (Fédération Nationale du Bois). Le second est un rapport d'Arbocentre (2005) : « L'Utilisation du Pin en région Centre, Pin durable volet 2 » avec la participation de la Région Centre de la DRAF Centre.

Il apparaît dans ces deux rapports que les catégories 0A et 0B sont intégralement destinées à la menuiserie. Les classes 1 et 2 sont toutes les deux utilisées à la fois pour la menuiserie et pour la charpente et la construction. Qualitativement, la classe 1 est surtout pour la menuiserie et la classe 2 surtout pour la construction. A défaut de statistiques fiables, on traduira ces « surtout » par 60% en menuiserie et 40% en construction pour le choix 1, et les pourcentages inverses, soient 40% en menuiserie et 60% en construction pour le choix 2. Le choix 3A est utilisé uniquement dans la filière emballage. Le tableau A26 récapitule ces choix.

<i>Choix</i>	<i>Menuiserie</i>	<i>Construction</i>	<i>Emballage</i>
<i>0A et 0B</i>	100%	0%	0%
<i>1</i>	60%	40%	0%
<i>2</i>	40%	60%	0%
<i>3A</i>	0%	0%	100%

Tableau A26 : Répartition dans les filières en fonction du choix des planches

Cette répartition n'est pas étayée par des données statistiques fiables, en particulier pour les catégories 1 et 2. Cependant, on notera que 1) les données n'existent pas et il faut prendre position 2) les durées de vie dans les filières menuiserie et construction sont assez proches ce qui limite la portée de ce positionnement.

Finalement, pour la répartition dans les filières, il est indispensable d'avoir une méthode proche de celle des feuillus pour être comparable. Il est alors préférable de classer les billons dans les cinq filières et non les planches.

Le classement d'un billon est alors effectué au prorata du classement des planches qui en sont issues. De plus, la biomasse des planches est connue, mais pas celle du billon pour lequel seul le volume est renseigné. L'infradensité choisie pour le reste du billon sera prise égale à la moyenne de l'infradensité de ses planches. L'exemple suivant illustre la méthode :

Supposons que 5 planches sciées à partir d'un billon de 0,4 m³ sous-écorce aient les caractéristiques du tableau A27.

	<i>Géométrie</i>	<i>Volume</i>	<i>Infradensité</i>	<i>Biomasse</i>	<i>Choix</i>
<i>Planche 1</i>	3m × 30cm × 5cm	0,045 m ³	0,45 t/m ³	20,25 kg	0A
<i>Planche 2</i>	3m × 30cm × 5cm	0,045 m ³	0,49 t/m ³	22,05 kg	0B
<i>Planche 3</i>	3m × 30cm × 5cm	0,045 m ³	0,49 t/m ³	22,05 kg	1
<i>Planche 4</i>	3m × 30cm × 5cm	0,045 m ³	0,55 t/m ³	24,75 kg	1
<i>Planche 5</i>	3m × 30cm × 5cm	0,045 m ³	0,59 t/m ³	26,55 kg	2

Tableau A27 : Exemple schématique de billonnage d'un billon de 0,4 m³ sous-écorce

Le volume des 5 planches est alors de $0,045 \times 5 = 0,225 \text{ m}^3$. Il vient alors que le volume du billon hors planches est de $0,175 \text{ m}^3$. L'infradensité moyenne des planches est de $0,514 \text{ t/m}^3$. La biomasse du billon hors planches est alors $0,514 \times 0,175 \times 1000 = 89,95 \text{ kg}$. La biomasse totale du billon est 205,6 kg.

Pour la répartition du billon dans les cinq filières d'utilisation, on utilise les règles de répartition du tableau A26 appliquées aux biomasses :

- Menuiserie : 100% des planches 1 et 2, 60% des planches 3 et 4, 40% de la planche 5, soit 81 kg
- Construction : 40% des planches 3 et 4, 60% de la planche 5, soit 34,65 kg

On obtient alors que 70,0% du billon est affecté à la filière menuiserie, et 30,0% à la filière construction.

Cette méthode entraîne une réduction de l'information, mais devient réellement comparable à la méthode de billonnage pour les feuillus, ce qui est le plus important.

Enfin, toute la partie restant du bois fort n'entrant pas dans les billons est affectée soit à la filière bois énergie, soit à la filière papier carton (durée de vie de 24 mois).

III.4 – Discussion

Lorsqu'un secteur économique est caractérisé par la présence de quelques grandes entreprises possédant la grande majorité des parts de marché, les études statistiques sont simplifiées. Le secteur des produits forestiers est inverse : les usages du bois sont extrêmement variés, et les utilisateurs très nombreux et différents. Dans ce secteur se trouvent aussi bien les livres des bibliothèques que les meubles bon marché ou les structures industrielles. Un certain nombre d'hypothèses ont dû être émises qui sont discutées ici.

III.4 – 1. Le recyclage

Un produit forestier subit systématiquement un recyclage avant de sortir des cycles définis dans ce chapitre et de retourner à l'atmosphère.

Par simplicité, dans les filières ameublement, construction et emballage, ce recyclage est identique : il correspond au passage dans la filière bois de feu ou pâte à papier. Cela confère à la durée de vie apparente de la filière un ajout de 24 mois.

Cette position pourrait être améliorée en étudiant finement les différents types de recyclage en fonction des produits. Par exemple, il est probable que les bois de charpente industrielle, lorsque les bâtiments sont détruits, ne sont pas recyclés de la même manière que les chutes de matière lors des sciages.

Cela mériterait une étude minutieuse en rassemblant des statistiques fiables sur les devenir des produits après usage. Ces informations sont peut être en partie accessibles pour le secteur industriel, au moins par enquête auprès des acteurs, mais sûrement très difficiles à recueillir pour les particuliers.

Ce travail est en dehors du cadre notre l'étude, et l'hypothèse d'une durée moyenne de deux ans entre le moment où le bois sort de la filière et celui où il retourne à l'atmosphère est gardée.

III.4 – 2. La non spécificité des produits

Dans les analyses présentées, les cycles de fabrication et d'utilisation des produits forestiers sont les mêmes quels que soient l'essence : un billon perd sa spécificité lorsqu'il passe du bois sur pied à la filière bois.

Cette hypothèse est assez forte, et l'essence considérée doit changer les pourcentages de répartition entre les sous-filières.

Cependant, la définition des cinq grandes filières a été utilisée pour limiter ces risques. En effet, changer les pourcentages de répartition des produits intra-filière en fonction de l'essence est équivalent à augmenter le nombre de grandes filières, or les statistiques sont déjà peu nombreuses avec seulement la répartition en ameublement, construction, papier/carton, bois énergie ou emballage. Le travail effectué par Paquet et Deroubaix (2003) est déjà considérable et la redéfinition / augmentation du nombre de filières n'apporterait plus de précision qu'après une analyse et une collecte de données colossales.

III.4 – 3. Utilisation de durées de vie

L'utilisation de durées de vie apparentes sous-entend que les produits ont un retour systématique à l'atmosphère. D'autres hypothèses sont possibles, comme celle utilisée par Besnehard (1998, 2000), qui estime qu'une partie des produits forestiers retourne très rapidement à l'atmosphère (suivant une loi exponentielle), et qu'une autre reste stockée de manière permanente. Cela permet d'envisager des stockages de très longue durée comme les livres dans les bibliothèques, ou les charpentes de très vieilles maisons.

Ces choix ne sont pas retenus, car ils pourraient conduire à des accumulations de stockage qui ne seraient pas réalistes si les simulations sont effectuées sur plusieurs siècles. En effet, même les maisons les plus robustes seront un jour hors d'usage et détruites, de même que les vieux bouquins finiront poussière ! L'utilisation des lois de Weibull permet, avec un paramétrage adéquat, de prendre en compte un stockage à long terme, mais non infini.

III.4 – 4. Répartition des produits

Enfin, la répartition des billons dans les différentes filières est un point critique pour l'appréhension du stockage dans les produits forestiers. Elle permet de différencier les choix sylvicoles, aussi bien en intensité de la sylviculture, que la longueur des révolutions ou l'essence choisie.

Dans le cas des résineux, le classement des planches est bien effectué, puisque le logiciel *WinEpiFn* a été prévu à cet effet. En revanche, la répartition de ces planches dans les différentes filières est seulement basée sur des documents à destination des industriels pour des usages indicatifs.

Cependant, la plus grande difficulté est la répartition entre le bois pour la construction et le bois pour l'ameublement pour les planches de choix 1 et 2 (cf. §A.III.3 – 3.2). Or ces deux filières ont des durées de vie apparentes proches (8,5 ans pour l'ameublement et 9,1 ans pour la construction). Les incertitudes quant à cette répartition ne sont alors pas très sensibles sur le résultat final.

Dans le cas des feuillus, le problème est différent. La répartition est faite en fonction du diamètre milieu du billon dans divers produits selon une règle écrite par Flammarion en 1986, et les usages du bois ont certainement évolué depuis cette époque, avec en particulier le développement des marchés du merrain et des panneaux. Aucune information plus récente n'a pu être trouvée dans la bibliographie concernant ces essences.

Enfin, dans le cas du Chêne sessile, les pourcentages de répartition des billons dans les produits (cf. tableau A22) sont égaux à ceux de la répartition nationale. Cette hypothèse est très forte mais de peu d'incidence sur le stock de carbone des produits forestiers en raison du classement des secteurs « Tranchage », « Ebénisterie », etc. dans les cinq grandes filières. Les classes *A*, *B1*, *B2* et *CI* sont tous les quatre affectés à la filière ameublement, ce qui fixe la répartition de tous les billons de diamètre milieu supérieur à 50 cm indépendamment des pourcentages de la ressource nationale. Ensuite, les secteurs *C2* et *T* sont affectés à la construction. Il s'ensuit que les billons de diamètre entre 30 et 49 cm sont affectés soit à l'ameublement, soit à la construction. De même que dans le cas des résineux, la durée de vie proche entre ces deux grandes filières limite l'impact d'une mauvaise répartition. Les petits billons (inférieurs à 20 cm sont intégralement affectés au filière bois énergie ou papier/cartons. Le problème ne se pose alors réellement que pour les billons de diamètre compris entre 20 et 29 cm. On peut alors considérer que le risque est minime.

PARTIE B

Exploitation d'une chaîne de modèles

Chapitre I – Capitalisation sur pied

Les forêts françaises présentent des volumes de bois sur pied assez faibles, mais en augmentation permanente depuis plusieurs décennies. Ils étaient en moyenne de 128 m³/ha en 1980 et de 145 m³/ha en 1991 d'après les données de l'IFN (Pignard 2000). De grandes disparités géographiques, mais aussi par classe de propriété existent. En effet, les volumes moyens étaient en 1991 de 188 m³/ha en forêt domaniale, contre 173 m³/ha en forêt communale et 133 m³/ha en forêt privée, qui représente près de 75 % de la forêt française (www.ifn.fr).

La comparaison des cycles d'inventaire de l'IFN fait apparaître que les taux de coupe sont ralentis, et que les prélèvements sont inférieurs à la production biologique. Ceci engendre un stockage du bois en forêt que l'on appelle la capitalisation sur pied.

Ce stockage pourrait devenir pérenne, soit par intérêt de production, soit par des incitations gouvernementales, et la capitalisation sur pied deviendrait alors un puits de carbone qui contribuerait aux objectifs de réduction des émissions de CO₂.

Il est alors nécessaire de savoir estimer quantitativement les gains engendrés par de telles pratiques. Ceux-ci doivent être considérés en fonction des différentes échelles de temps : on devra en effet distinguer ce que l'on appellera le régime transitoire du régime permanent.

Le régime permanent correspond à un état d'équilibre global atteint en pratiquant indéfiniment la même sylviculture sur une station donnée. L'étude des régimes permanents permet alors d'évaluer l'équilibre le plus favorable pour le stockage du carbone à long terme. L'hypothèse *a priori* est que les peuplements denses constituent des stocks de carbone plus importants que les peuplements clairs.

La problématique du régime transitoire est toute autre, et n'aboutit pas nécessairement aux mêmes résultats. En effet, il correspond à la cinétique de passage d'un régime permanent à un autre lorsque les choix sylvicoles sont modifiés. Le ralentissement des taux de coupe pour arriver à un peuplement plus dense va engendrer localement, au moment où cette pratique est effectuée et pour plusieurs années voire décennies, une absorption nette importante de carbone par la forêt. Cela peut permettre de répondre à des objectifs de court ou moyen terme, comme par exemple un stockage intensif jusqu'à l'horizon 2050, sans que le régime permanent auquel on aboutit soit nécessairement plus favorable.

Ce chapitre aborde ces problématiques par la simulation de peuplements de Chêne sessile et de Hêtre en comptabilisant le carbone des compartiments sol, biomasse et produits forestiers. Dans un premier temps, la démarche pour effectuer les simulations est présentée en comparant le cas particulier d'un peuplement de Chêne sessile conduit soit avec une sylviculture dynamique, soit avec une sylviculture peu intensive. Ensuite, l'impact des choix d'itinéraires sylvicoles sera abordé de manière beaucoup plus exhaustive pour les deux essences en régime permanent. Le régime transitoire n'est étudié que dans une situation type.

I.1 – Démarche et comparaisons

L'objet de ce paragraphe est de fixer les méthodes utilisées dans les simulations, aussi bien sur la manière de conduire les sylvicultures que sur la comparaison de comptabilité du carbone. Ces mises au point sont exposées au travers de deux sylvicultures très différentes, à savoir une situation à très faible densité et une situation à très forte densité. Le détail de l'influence de ces gestions forestières sur le carbone est analysé compartiment par compartiment en suivant l'évolution du carbone le long de la sylviculture. Dans les paragraphes B.I.2 et B.I.3, les méthodes sont identiques, mais de nombreuses simulations sont comparées, et seuls les résultats sont présentés et discutés.

Les conditions de ce premier paragraphe sont un peuplement homogène de Chêne sessile issu de régénération naturelle dont l'indice de fertilité est 25 mètres à 100 ans. Le carbone moyen est calculé comme l'intégrale de la courbe d'évolution du carbone de chaque compartiment, divisée par la longueur de la révolution. Ceci est également valable pour les produits forestiers.

I.1 – 1. Sylvicultures pratiquées

Les variations d'intensité de sylviculture sont exprimées dans le simulateur *Fagacées* grâce à la variable RDI (cf. §A.I.1) (Reineke 1933). Les deux sylvicultures pratiquées sont appelées « scénario clair » pour le premier et « scénario dense » pour le second.

Rappelons qu'un scénario sylvicole est entièrement défini par un couple (RDI initial ; RDI final). Celui-ci permet de définir une droite de RDI objectifs tout au long de la sylviculture. Les éclaircies sont déclenchées automatiquement d'après la méthode exposée au paragraphe A.I.1, *i.e.* dès que le RDI du peuplement dépasse la valeur du RDI objectif + 0,05, une éclaircie le ramène à la valeur du RDI objectif - 0,05.

Les différentes densités doivent s'accompagner d'autres modifications pour rester des sylvicultures admissibles en pratique. En particulier, pour les scénarios denses, la baisse de l'intensité des éclaircies implique une augmentation du nombre d'arbres au moment de la coupe finale, mais aussi une diminution des diamètres. La durée de révolution n'est alors pas identique pour les deux scénarios, mais correspond au temps nécessaire à l'obtention d'un diamètre dominant objectif de 70 cm.

Pour le scénario clair et le scénario dense définis plus haut, les couples de RDI sont (0,5 ; 0,5) et (0,9 ; 0,9). Les RDI des simulations effectuées dans ces conditions sont exposées figure B1, exportée depuis l'environnement CAPSIS (de Coligny *et al.* 2003). Les variables peuplement sont données dans le tableau B1. Notons en particulier qu'il faut 156 ans (resp. 219 ans) pour atteindre le diamètre dominant objectif de 70 cm avec le scénario clair (resp. dense).

	Age	H0	N	G	D ₀
<i>Scénario clair</i>	156	32,2	58	22,3	70,0
<i>Scénario dense</i>	219	40,0	112	42,4	70,1

Tableau B1 : Caractéristiques peuplement des deux scénarios en fin de révolution

Cette méthode n'est pas parfaite, et il est visible en particulier que dans le jeune âge, les éclaircies sont trop fréquentes. Néanmoins, des essais de sylvicultures en élargissant la bande passante tout en gardant le même RDI objectif, et donc en diminuant le nombre d'éclaircies, montrent qu'il y a peu d'incidence sur le stock de carbone final.

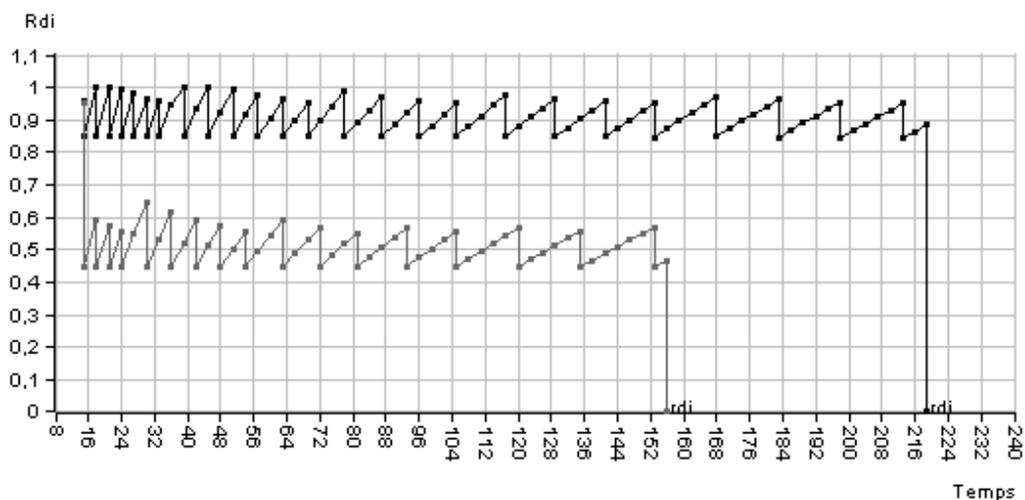


Figure B1 : Densités, exprimées en RDI, des scénarios clair (en gris) et dense (en noir)

En revanche, la méthode présente le grand avantage d'être systématique, et d'être définie uniquement par un couple (RDI initial ; RDI final), et donc de permettre des comparaisons aisées entre les scénarios.

1.1 – 2. Carbone du système foliaire

Le système foliaire n'est pas pris en compte dans les simulations fagacées. Le stock de carbone qu'il représente est faible en comparaison de celui des autres compartiments, et les variations avec la sylviculture négligeables (cf. §A.I.2). On prendra donc simplement les valeurs retenues dans l'étude CARBOFOR (Loustau 2004) : pour les feuillus 3,1 tMS/ha et 7,8 tMS/ha pour les résineux. De plus, les analyses des chutes de litière du réseau RENECOFOR indiquent des pourcentages de carbone dans la matière sèche de 50,8% pour les feuillus, et 52,9% pour les résineux (cf. §A.II.4). On obtient alors des valeurs de 1,57 tC/ha pour les feuillus et 4,13 tC/ha pour les résineux.

1.1 – 3. Carbone du système racinaire

Le système racinaire intervient à deux niveaux pour les bilans de carbone globaux. D'une part, il représente un stockage brut conséquent, d'autre part, le turnover contribue à l'alimentation en carbone du compartiment sol. Les deux volets, en lien avec la sylviculture, sont abordés dans ce paragraphe.

1.1 – 3.1. Influence de la densité sur le stock racinaire

Le stock global de carbone des racines est estimé en sommant la contribution de chaque arbre du peuplement, pour lequel le volume racinaire est calculé au moyen de relations allométriques développées par Drexhage (1999, 2001). La méthode est détaillée dans la partie A, §I.2.

Le scénario clair contient beaucoup moins d'arbres que le scénario dense. Si une année donnée il est approximativement trois fois moindre, les individus ont en revanche de plus gros diamètres. Ces deux facteurs se compensent en partie, mais le stock racinaire du scénario clair reste inférieur au stock du scénario dense (figure B2).

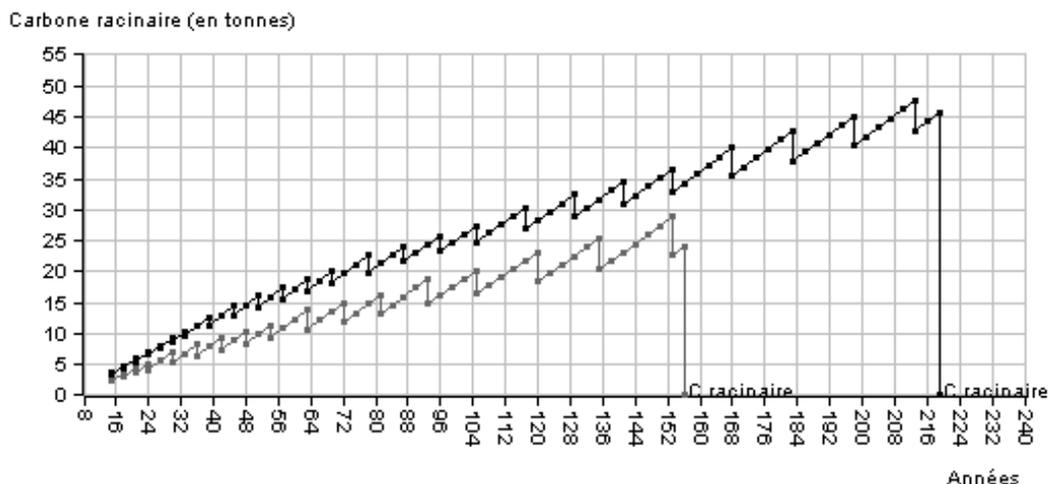


Figure B2 : Carbone racinaire hors racines fines (en tC/ha) en fonction du temps pour les scénarios clair (en gris) et dense (en noir)

Dans le cas d'une étude du régime permanent, si l'on suppose que les révolutions sont appliquées indéfiniment, il faut comparer les moyennes annuelles de stock de carbone. Pour ces deux types de sylviculture, il apparaît que le scénario dense est doublement favorable en termes de stockage racinaire : i) le stockage est supérieur, ii) le scénario est plus long, alors que le stockage est le plus élevé en fin de révolution, ce qui induit des moyennes annuelles bien supérieures. En effet, le stock annuel moyen sur l'ensemble de la révolution est de 14,0 tC/ha pour le scénario clair, alors qu'il est de 25,9 tC/ha pour le scénario dense.

1.1 – 3.2. Influence de la sylviculture sur les apports racinaires au sol

Les apports racinaires de carbone au sol se font par le turnover, décomposition permanente des racines, en particulier des racines fines, mais aussi par la décomposition des systèmes racinaires d'arbres morts ou éclaircis. Ce paragraphe indique l'influence de la densité de la sylviculture sur ce deuxième point, qui pourrait modifier directement le stock de la matière organique du sol. L'apport par le turnover a été appréhendé dans la partie A.

Pour connaître les contributions des sylvicultures claire et dense, la production racinaire nette (hors turnover) doit être calculée. Il s'agit de la somme des accroissements à chaque pas de simulation, lorsque les éclaircies sont écartées.

La quantité ainsi définie est illustrée par la figure B3.

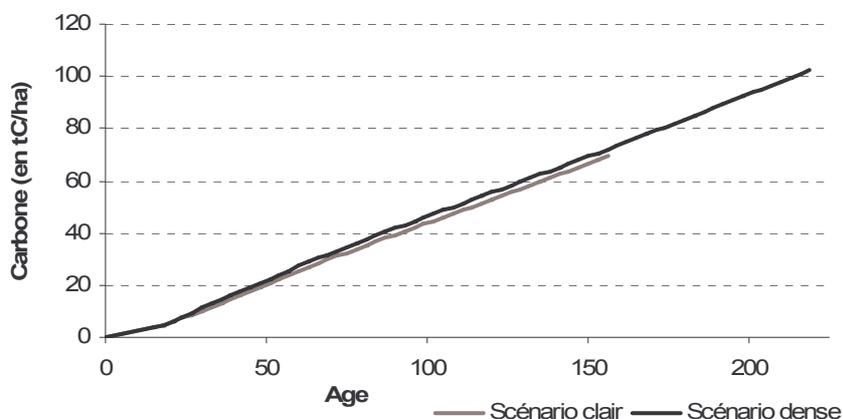


Figure B3 : Production nette cumulée de carbone racinaire (hors turnover)

Il apparaît sur cette figure que la production de racines est presque identique pour les deux scénarios. La différence est de l'ordre de 0,022 tonnes de carbone par hectare et par an. Cette différence est minimale, et engendre très peu de modifications sur les apports de stock de carbone à la matière organique du sol.

L'utilisation de CENTURY permet d'estimer l'implication d'une telle modification d'apport : une première simulation est effectuée en utilisant les apports moyens (3,900 tC/ha/an) calculés dans le paragraphe A.II.6 – 3., puis une seconde en ajoutant 0,022 tonnes de carbone par hectare et par an. Après obtention de l'équilibre (simulation sur 10 000 ans), la première situation indique un stockage de carbone dans la matière organique de 85,9 tC/ha, et 87,1 tC/ha pour la seconde.

Ces variations sont extrêmement faibles par rapport aux précisions obtenues pour le carbone du sol et seront négligées.

Cependant, il faut noter que :

- La répartition temporelle des apports n'est pas identique pour les deux scénarios. Pour le scénario clair, des apports importants sont engendrés par chaque éclaircie. Pour le scénario dense, les apports au cours de la révolution sont moindres, en revanche une importante quantité de carbone est amenée au moment de la coupe finale.
- Le scénario clair comporte moins d'arbres, mais chacun ayant un système racinaire plus développé. Il est alors probable que les racines des arbres du scénario clair soient en moyenne plus grosses que pour le scénario dense, et aient par là même un temps de résidence sous forme de système racinaire mort plus long.

Ces deux points sont négligés dans les comparaisons.

1.1 – 4. Carbone du sol

Etant donnés les résultats et approximations des paragraphes précédents sur l'effet de la sylviculture sur les apports de carbone foliaires et racinaires, la différence des apports entre les deux sylvicultures est nulle.

Les apports étant identiques, les variations de carbone du sol sont négligées dans le cadre de la stratégie de capitalisation sur pied. La valeur retenue est celle des conditions moyennes (§A.II.6 – 2.), c'est-à-dire 85,9 tC/ha (valeur pour le Chêne sessile).

1.1 – 5. Carbone des parties aériennes ligneuses

Le volume des parties aériennes est estimé au moyen de tarifs de cubage à double entrée. Il s'agit de tarifs pour le volume total aérien, c'est-à-dire jusqu'à la découpe 0 cm (Vallet 2002, Vallet *et al.* 2005).

Le scénario clair présente un volume sur pied moindre que le scénario dense (figure B4).

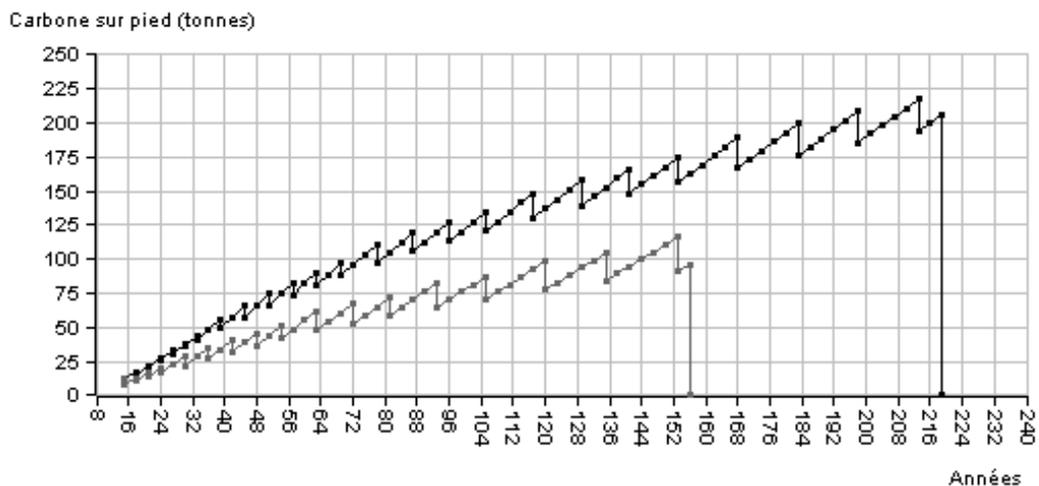


Figure B4 : Evolution du carbone sur pied (en tC/ha) pour les scénarios clair (en gris) et dense (en noir)

Le même principe que dans le cas du stock des systèmes racinaires s'applique à la partie aérienne : le nombre d'arbres à un âge donné trois fois plus faible dans le cas du scénario clair est en partie (mais pas totalement) compensé par les diamètres plus élevés des individus.

D'autre part, définissons la production nette de carbone dans les parties aériennes ligneuses au cours de la révolution comme la somme des accroissements à chaque pas d'évolution, donc à l'exclusion des éclaircies. Cette production nette est plus importante dans le cas du scénario dense que le scénario clair (figure B5).

Cette différence entre les deux scénarios est sans doute partiellement compensée par un sous-étage plus important dans le cas de la sylviculture claire. En effet, si les éclaircies sont plus fortes, celui-ci peut se développer davantage. Celui-ci n'est pas représenté dans *Fagacées*.

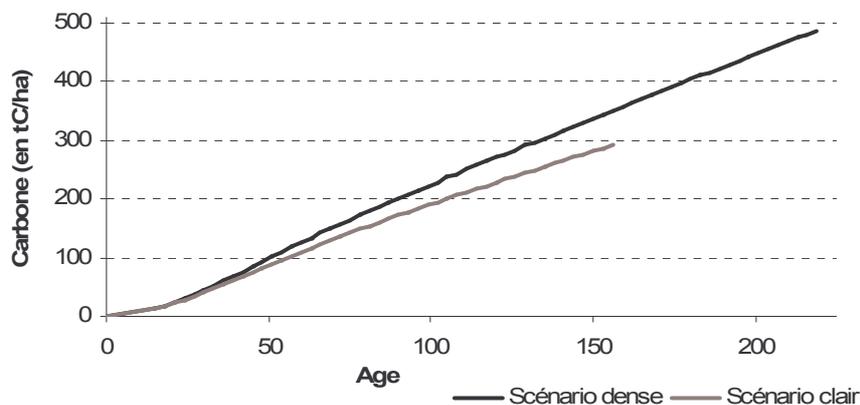


Figure B5 : Production nette cumulée de carbone par les parties aériennes ligneuses

Le stock de carbone moyen pour l'ensemble de la révolution est de 59,2 tC/ha pour le scénario clair et 121,9 tC/ha pour le scénario dense. La valeur presque double du carbone dans le cas du scénario dense s'explique par 1) le scénario dense produit plus de carbone aérien, 2) les prélèvements par éclaircie sont plus importants dans le cas du scénario clair, 3) la révolution du scénario dense est plus longue de 60 ans, et c'est dans les dernières années que le stock de carbone est le plus fort.

1.1 – 6. Carbone des produits forestiers

A chaque étape d'éclaircie un certain volume de bois est exporté de la forêt pour passer dans le compartiment produits forestiers. Les arbres sont billonnés et répartis dans les différentes filières bois suivant la règle définie §A.III.2 – 1., puis le retour de carbone à l'atmosphère se fait suivant une loi de Weibull avec une espérance de durée de vie apparente tenant compte des rendements matière lors des transformations.

Les billonnages des arbres génèrent des volumes, et non une quantité de carbone. Une infradensité moyenne de $0,51 \text{ t/m}^3$ pour le chêne, et un taux de carbone de 47,5 % de la matière sèche sont appliqués. Cette infradensité moyenne correspond au rapport du volume aérien total du peuplement sur le carbone aérien total calculé ci-dessus.

Que ce soit pour le scénario clair ou le scénario dense, les durées de vie des produits forestiers sont très courtes en comparaison de la longueur de la révolution, et le stock de carbone correspondant est très faible en comparaison de celui du peuplement forestier (figure B6).

Dans les deux cas, les premières éclaircies font sortir de petits volumes de la forêt, essentiellement à faible durée de vie comme le bois énergie. La coupe finale en revanche produit des volumes utilisés dans la construction ou l'ameublement, plus longévives.

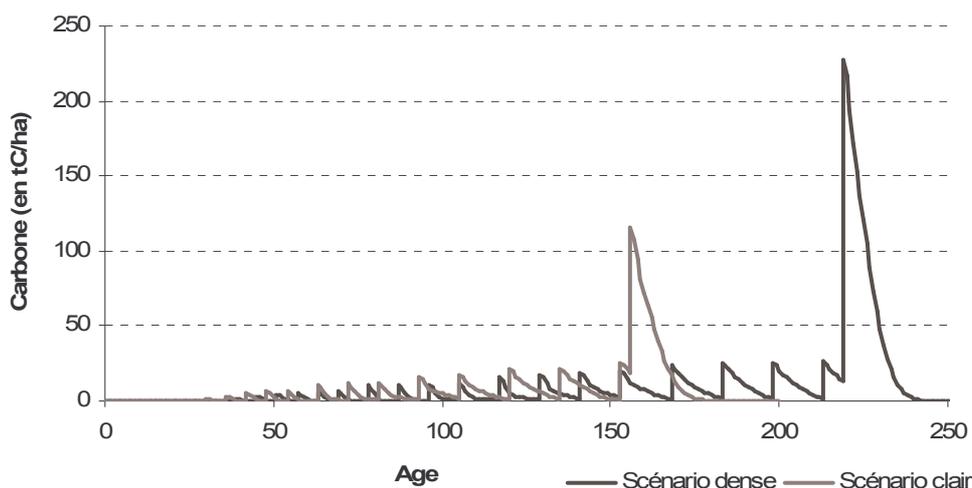


Figure B6 : Stock de carbone des produits forestiers (en tC / ha) pour les deux scénarios

Les stocks moyens sur l'ensemble de la révolution sont de 9,0 tC/ha pour le scénario clair et 12,4 tC/ha pour le scénario dense. La répartition des produits dans les différentes filières est différente pour les deux scénarios (tableau B2). On observe juste une diminution de la part de bois énergie dans le cas du scénario dense par rapport aux autres filières.

Cependant, le stock annuel moyen supérieur de 37,8 % (12,4 tC/ha contre 9tC/ha) du scénario dense par rapport au scénario clair s'explique essentiellement par la plus grande quantité d'apport.

	<i>Scénario clair</i>	<i>Scénario dense</i>	<i>Durée de vie apparente</i>
<i>Bois de feu</i>	43,9 %	37,8 %	2 ans
<i>Ameublement</i>	42,3 %	47,3 %	8,5 ans
<i>Construction</i>	13,8 %	14,9 %	9,1 ans

Tableau B2 : Répartition en volume des produits dans les différentes filières pour les scénarios clair et dense

1.1 – 7. Bilan pour les deux scénarios considérés

Les paragraphes de cette première partie présentent l'évolution du carbone de chacun des compartiments individuellement. Les figures *B7 a)* et *b)* montrent le bilan des deux scénarios lorsque tous les compartiments sont additionnés. La figure *B8* compare les deux situations.

Le scénario dense stocke plus de carbone que le clair, en raison à la fois d'un accroissement plus important à âge égal, mais aussi car la révolution est plus longue, et le peuplement reste donc plus longtemps au stade où le stock est le plus important.

Les moyennes annuelles de stockage sont de 169,7 tC/ha pour le scénario clair contre 247,7 tC/ha pour le scénario dense. La figure *B9* indique que les systèmes racinaires, et plus encore la partie aérienne, sont responsables du stock annuel moyen supérieur du scénario dense.

Par-delà les valeurs quantitatives présentées dans ce paragraphe « Démarche et comparaison », il faut noter les méthodes employées pour comptabiliser le carbone dans les différents compartiments. Elles sont identiques dans la suite. Pour l'étude du régime permanent, on s'intéressera essentiellement aux stocks moyens de carbone sur l'ensemble de la révolution, tels que présentés tout au long de ce paragraphe ainsi qu'à la figure *B9*, alors que pour l'étude du régime transitoire, les cinétiques d'évolution du carbone telles que présentées figure *B8* seront privilégiées.

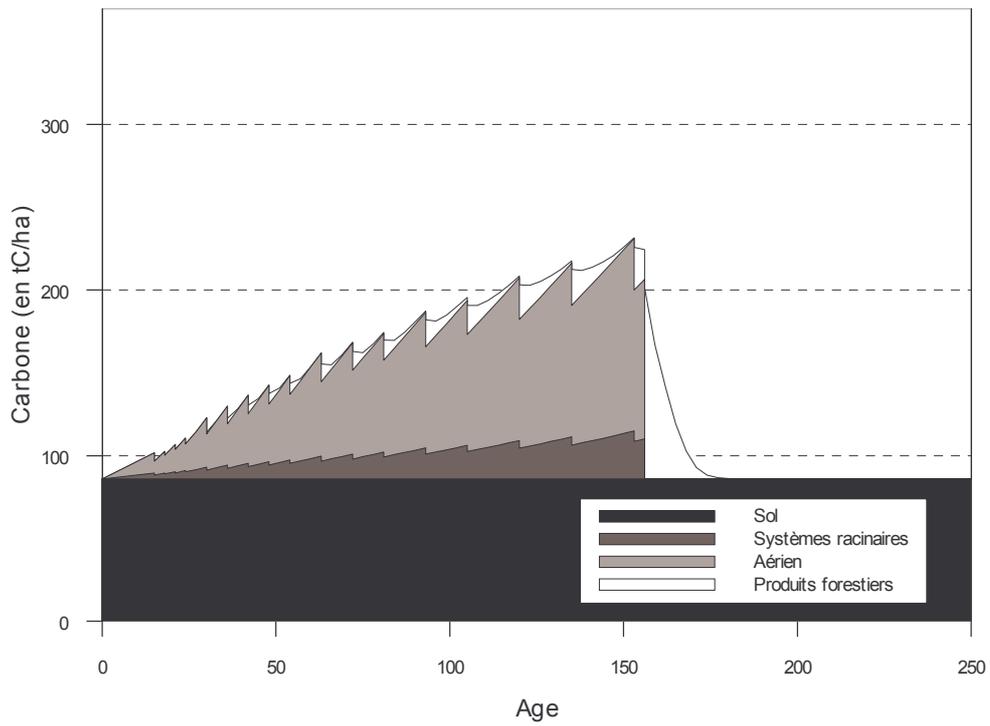


Figure B7 a) : Bilan global de carbone pour le scénario clair, les quantités de carbone sont cumulées

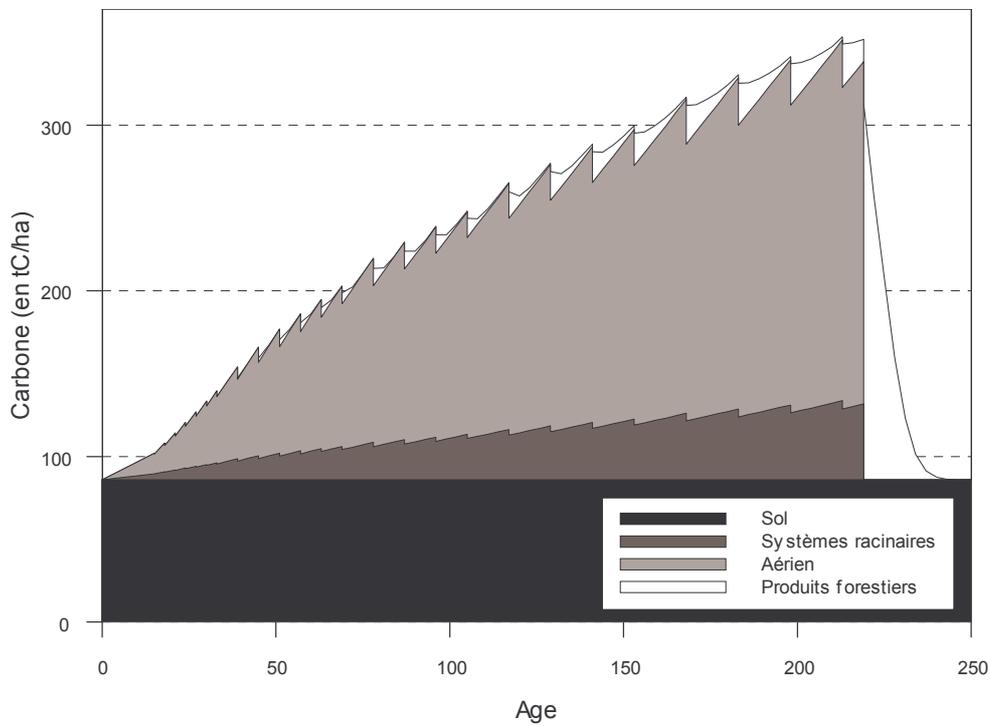


Figure B7 b) : Bilan global de carbone pour le scénario dense, les quantités de carbone sont cumulées

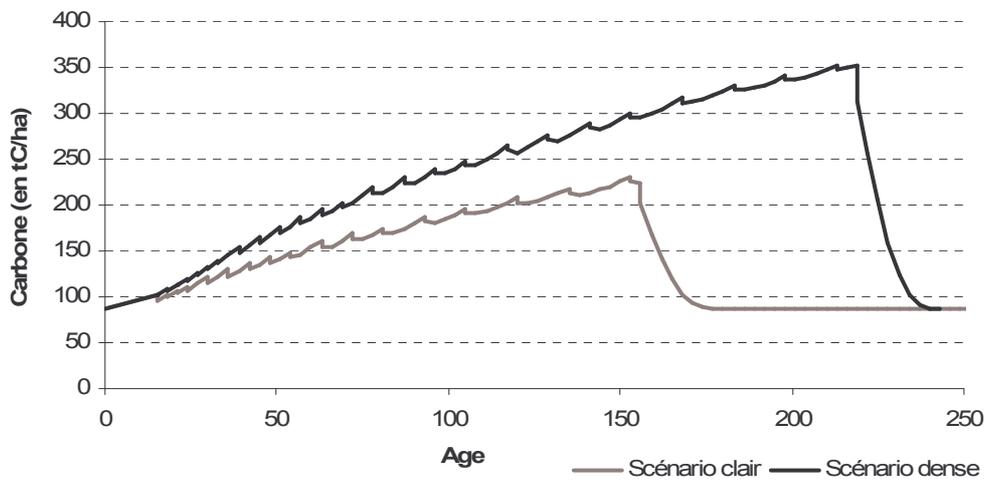


Figure B8 : Comparaison du bilan de carbone total pour les scénarios clair et dense

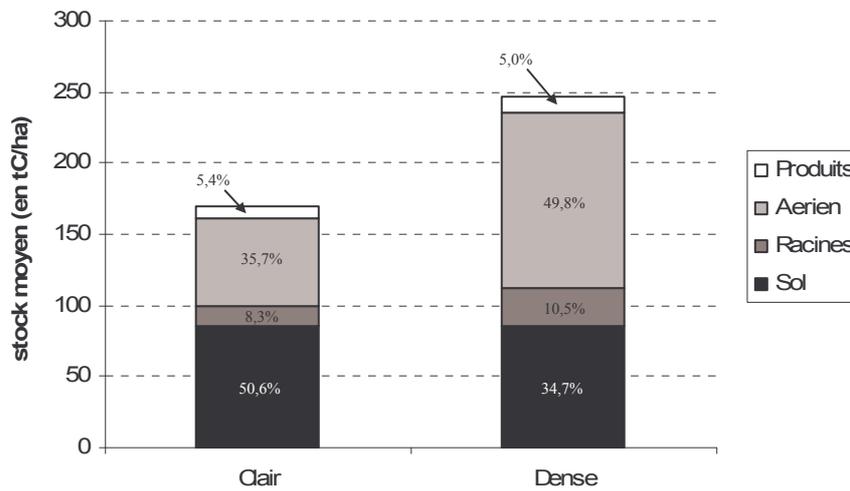


Figure B9 : Stock moyen sur l'ensemble de la révolution par compartiment pour les scénarios clair et dense

I.2 – Etude du régime permanent

Une modification de la gestion sylvicole dans le but d'accroître le stock de carbone peut être assimilée au passage d'un régime permanent à un autre. Pour l'étude des stratégies de stockage de carbone à long terme, il est suffisant d'étudier le différentiel de stock entre les deux régimes permanents. En revanche, l'étude du régime transitoire, et donc des cinétiques de ces variations de stocks permettent de répondre à des stratégies à court ou moyen terme.

Ce paragraphe est consacré à l'étude des régimes permanents uniquement, le régime transitoire de la capitalisation sur pied est appréhendé après.

I.2 – 1. Cas du Chêne sessile

I.2 – 1.1. Influence de la densité et de la fertilité des peuplements

Dans le cas du Chêne sessile, comme dans celui du Hêtre, la densité des peuplements dans le simulateur *Fagacées* est le RDI. La section précédente « Démarche et comparaisons » et le paragraphe I.1 de la partie A exposent la manière dont cet indicateur est utilisé dans les simulations.

L'étude de l'influence de la densité sur le stock de carbone est menée en faisant varier les RDI initiaux et de RDI finaux de la simulation sur l'ensemble de la gamme admissible. Les valeurs minimales pour le RDI sont de 0,5, correspondant à un peuplement très clair, et les maximales de 0,9, pour un peuplement très dense.

Le critère d'arrêt pour la sylviculture est l'obtention d'un diamètre dominant, plutôt qu'un âge d'exploitabilité objectif. Pour le Chêne sessile, le diamètre objectif est de 70 cm, ce qui correspond aux pratiques recommandées par l'ONF (Jarret 1996). Rappelons que le diamètre dominant est le diamètre quadratique moyen des 100 plus gros arbres à l'hectare. Les durées des révolutions dépendent alors de l'intensité de la sylviculture.

I.2 – 1.1.1 Bilans de carbone en fonction de la densité pour trois fertilités

Les simulations sont effectuées pour trois fertilités différentes afin d'en estimer l'influence. Les fertilités choisies correspondent aux classes du bulletin technique de l'ONF (Jarret 1996), c'est-à-dire 20 mètres à 100 ans pour un peuplement très peu productif, 25 mètres à 100 ans pour un peuplement moyen, et 30 mètres à 100 ans pour un peuplement très productif.

Le critère d'arrêt étant un diamètre d'exploitabilité, les durées de révolution sont très variables entre les simulations. Avec des sylvicultures très intensives, les arbres subissent moins de compétition et poussent plus rapidement en diamètre (Dhôte 1991). Le tableau B3 indique les âges minima et maxima des révolutions pour les trois classes de fertilité.

<i>Fertilité</i>	<i>Age minimum</i>	<i>Age maximum</i>
Faible (20 m à 100 ans)	186 ans	255 ans
Bonne (25 m à 100 ans)	156 ans	219 ans
Très bonne (30 m à 100 ans)	129 ans	189 ans

Tableau B3 : Ages nécessaires pour l'obtention du diamètre d'exploitabilité 70 cm

L'âge minimum (129 ans) est obtenu pour la meilleure fertilité et pour la sylviculture la plus dynamique, alors que l'âge maximum (255 ans) intervient à l'opposé pour la moins bonne fertilité et pour la sylviculture la moins intensive.

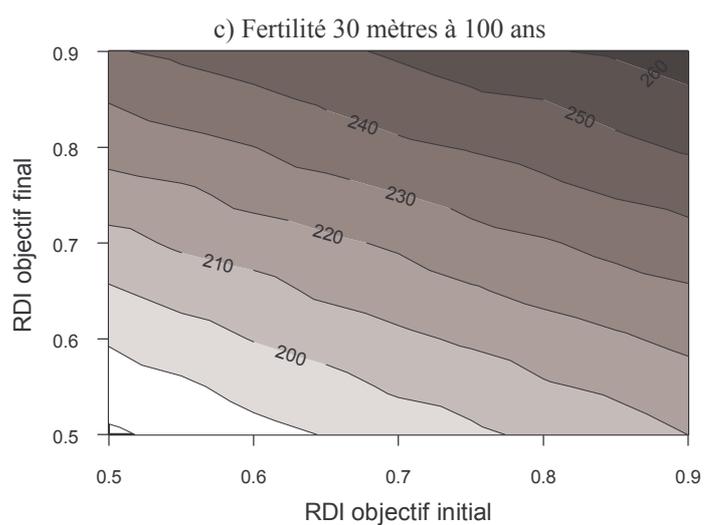
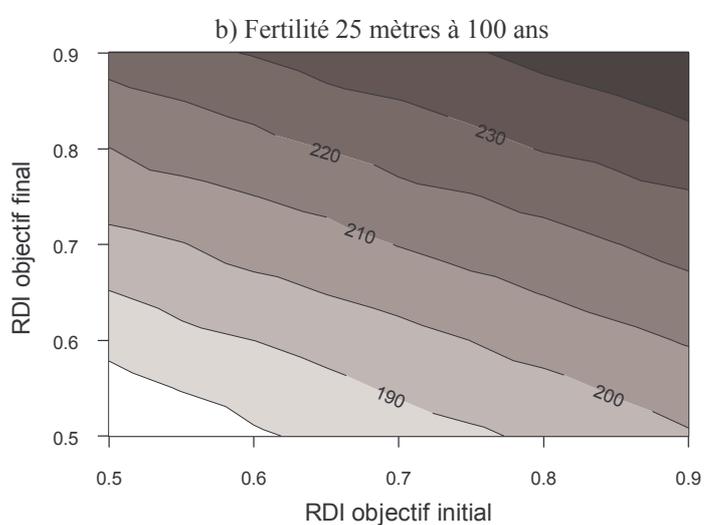
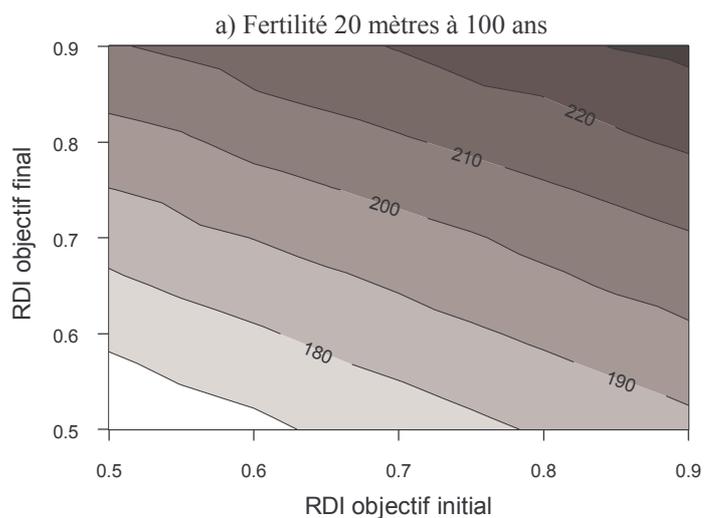
Les figures *B10* montrent les stocks moyens pour chaque itinéraire sylvicole (correspondant donc à un couple RDI initial / RDI final). Ces valeurs prennent en compte l'ensemble du carbone stocké par le peuplement que ce soit dans la biomasse, le sol ou les produits forestiers, de la manière décrite dans le paragraphe B.I.1.

Ces figures, qui résument une grande partie des acquis de la thèse, font apparaître plusieurs résultats.

D'abord, dans les trois cas de fertilité, le stock de carbone est maximal pour les sylvicultures conduites de manière dense sur toute la durée de révolution (RDI initiaux et finaux maximaux). Ce résultat était attendu et concorde avec les travaux précédents sur le Chêne sessile menés au laboratoire (Le Moguédec 2002, Bucket *et al.* 2005).

Un deuxième point intéressant de ces résultats est la dépendance du stock de carbone moyen avec les deux RDI. Le RDI initial a cependant une influence moindre que le RDI final. Ce résultat s'explique par la différence forte de stockage entre le début et la fin de la révolution. En effet, même si le peuplement est très dense en début de révolution, le stock de carbone est assez limité, les arbres ayant de faibles hauteurs. La différence de densité dans le jeune âge entraîne donc des amplitudes de stocks en valeur absolue moindres que les mêmes différences de densité en fin de révolution.

Enfin, on note que la fertilité a un effet relativement faible sur le stock moyen de carbone. La gamme de variation maximale pour le peuplement le moins fertile est de 161 à 232 tC/ha, pour le peuplement moyen de 170 à 248 tC/ha, et pour le plus productif de 178 à 264 tC/ha. Cette relativement faible différence par rapport à la très large fourchette de fertilités a plusieurs causes. D'abord le sol est considéré ayant le même stock de carbone dans les trois situations, et il représente à lui seul 85,9 tC/ha. Cette partie constante masque les variations dues à la biomasse ainsi qu'aux produits forestiers. D'autre part, le diamètre d'exploitabilité est fixé à 70 cm pour les trois situations. Les durées des révolutions sont alors très différentes suivant les fertilités. Par exemple en choisissant une sylviculture moyenne (RDI initial = RDI final = 0,7), la durée de révolution est de 168 ans (resp. 198 ans et 222 ans) pour la meilleure fertilité (resp. bonne et faible). Si les hauteurs dominantes à âge donné sont bien plus faibles pour les moins bonnes fertilités, les peuplements poussent plus longtemps, et en fin de révolution les hauteurs dominantes sont alors partiellement compensées. Il s'ensuit que le stock de carbone moyen l'est également. La figure *B11* illustre cette compensation : elle montre la biomasse aérienne de ces trois situations en fonction de l'âge du peuplement. On remarque qu'à l'âge d'exploitation du peuplement fertile (168 ans), les stocks des deux autres peuplements sont plus faibles, mais sont en partie compensés les années suivantes. Les constats sont similaires pour la biomasse racinaire et les produits forestiers.



Figures B10 : Stocks de carbone moyens (en tC/ha) en fonction de la sylviculture pour des peuplements de Chêne sessile avec des fertilités de a) 20 m à 100 ans, b) 25 m à 100 ans, c) 30 m à 100 ans

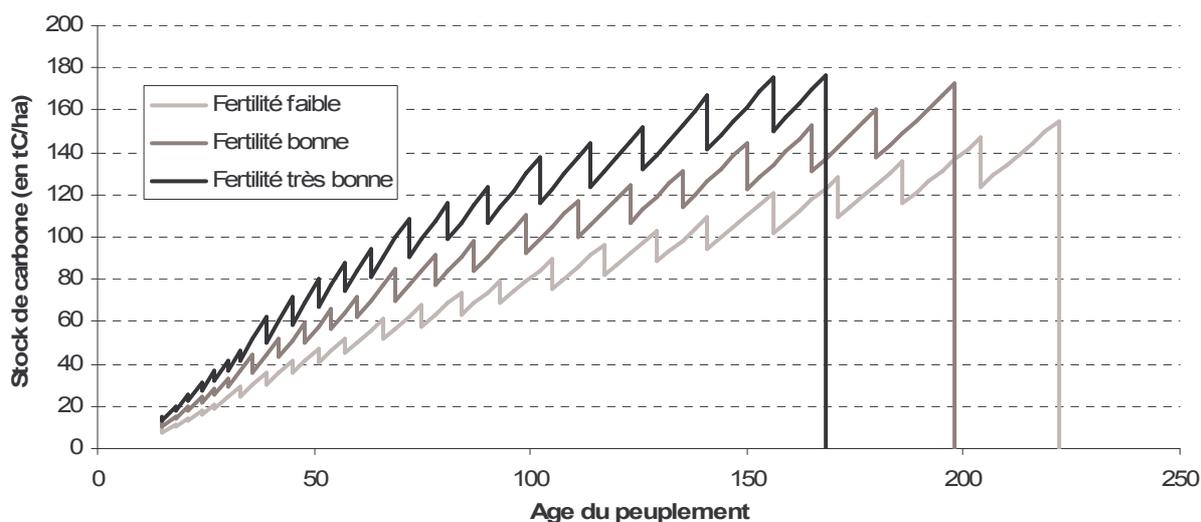


Figure B11 : Stock de carbone dans la biomasse aérienne en fonction du temps pour les trois fertilités (20m, 25m et 30m à 100 ans). La sylviculture est moyenne (RDI initial = RDI final = 0,7), le diamètre dominant d'exploitabilité est 70 cm.

I.2 – 1.1.2 Répartition des stocks pour une situation type

La gamme de variation de stock de carbone dans le cas de la bonne fertilité est de 170 tC/ha pour les scénarios les plus clairs à 248 tC/ha pour les plus denses. Ce paragraphe décrit les répartitions de stockage après obtention des régimes permanents.

Pour les scénarios clair (RDI initial = RDI final = 0,5) et dense (RDI initial = RDI final = 0,9), les stocks de carbone sont répartis selon la figure B12. Les stocks de carbone moyens sont essentiellement constitués par le sol et la biomasse aérienne (comprenant tiges, branches et feuilles). La partie racinaire représente entre 20 % et 25 % de l'aérien, ce qui est cohérent avec la littérature (Dupouey *et al.* 1999, Loustau 2004).

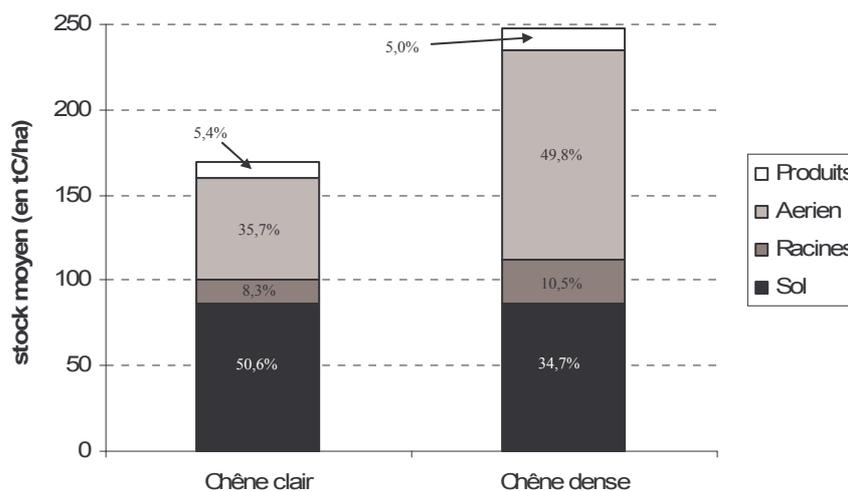


Figure B12 : Répartition du stock moyen de carbone dans les différents compartiments

D'autre part, le stock engendré par les produits forestiers est très faible, mais la proportion entre celui-ci et le stock aérien concorde aussi avec des résultats simulés par Liski (2001) pour des peuplements de Pin sylvestre en Finlande. La comparaison avec les résultats de Liski est détaillée plus largement dans la partie substitution d'essence.

Les produits issus des récoltes lors des éclaircies ou lors de la coupe finale se répartissent pour le Chêne dans trois filières : la filière ameublement, la filière construction et la filière bois énergie. La répartition dans ces trois filières est montrée figure B13 en même temps que leurs contributions aux stocks moyens correspondants.

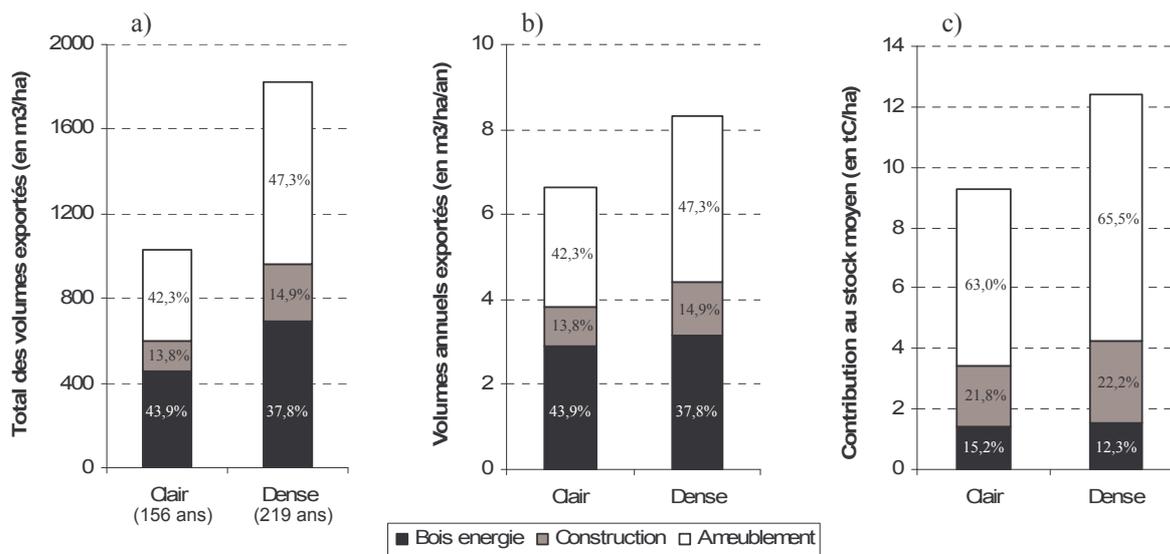


Figure B13 : Produits issus des deux sylvicultures
a) Volume total exporté sur l'ensemble de la révolution (en m³/ha)
b) Volumes annuels exportés (en m³/ha/an)
c) Contribution au stock de carbone moyen (en tC/ha)

Les révolutions sont de 156 ans pour le scénario clair, 219 ans pour le scénario dense

La sylviculture très dense produit près de deux fois plus de produits que la sylviculture très claire sur des révolutions respectives de 219 et 156 ans, mais les proportions entre les différentes filières sont conservées. Ce résultat est dû au choix d'un diamètre dominant comme critère d'arrêt pour les révolutions. En effet, puisque les sylvicultures sont arrêtées lorsque ce diamètre est atteint, et que les règles de répartition sont liées aux diamètres des billons, alors les répartitions dans les différentes filières sont nécessairement proches. Par ailleurs, le diamètre d'exploitabilité choisi pour ces simulations est 70 cm, ce qui implique une très forte proportion de bois dans la filière ameublement. Des diamètres inférieurs seraient plus favorables au bois construction (cf. règles de répartition du §A.III). L'influence du diamètre d'exploitabilité est étudiée dans le paragraphe suivant.

Enfin, notons qu'en volume produit, le secteur bois de feu représente une très large part du volume total. En revanche, sa faible durée de vie en fait la filière contribuant le moins au stock de carbone moyen. Rappelons ici que nous nous intéressons uniquement au stockage de carbone, et que la substitution des combustibles fossiles par le bois énergie n'est pas appréhendée.

1.2 – 1.2. Influence du diamètre d'exploitabilité

Un certain nombre de paramètres influent sur le stock de carbone, et sont étudiés dans ce travail. Cependant, il ne serait pas raisonnable de vouloir tous les faire varier en même temps, cela poserait des soucis de temps de calcul, aussi bien que de clarté des représentations visuelles.

Ainsi, pour estimer l'influence du diamètre d'exploitabilité, nous nous bornerons à une seule fertilité (25 mètres à 100 ans correspondant à une bonne fertilité), et les peuplements sont conduits à densité constante au cours de la révolution (RDI initial = RDI final) (figure B14). En pratique, dans une optique d'optimisation de la sylviculture, on adopterait des diamètres d'exploitabilité d'autant plus faibles que la croissance est plus lente (densité élevée ou fertilité faible).

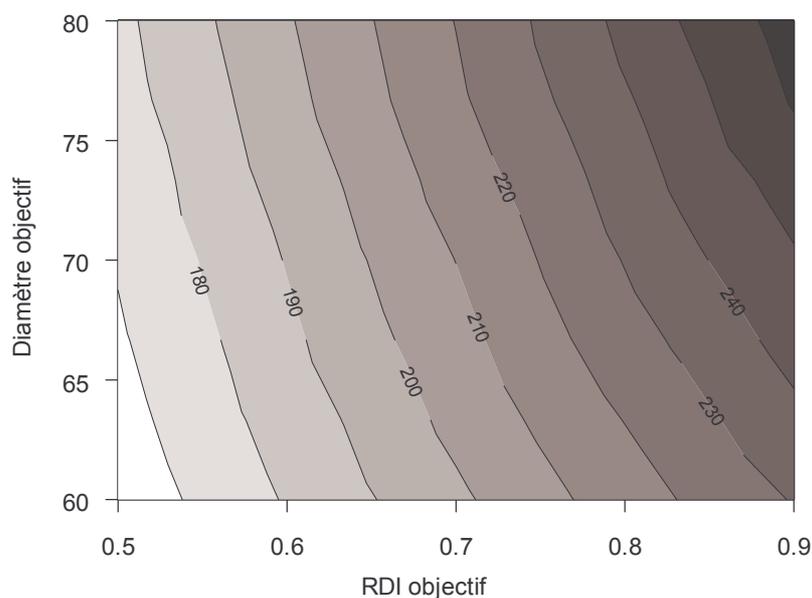


Figure B14 : Stocks de carbone moyens (tC/ha) en fonction du diamètre objectif d'exploitabilité et de la densité du peuplement (RDI objectif = RDI initial = RDI final)

Les courbes de niveau de la figure B14 sont presque verticales, ce qui montre que le stock de carbone moyen est beaucoup plus sensible à l'intensité de la sylviculture qu'au diamètre d'exploitabilité. Il y a cependant une légère augmentation du stock pour les diamètres objectif les plus élevés.

La répartition des stocks de carbone entre les compartiments biomasse racinaire, biomasse aérienne et produits forestiers est très similaire à celles obtenues dans les simulations précédentes pour les scénarios clair et dense. Par exemple, pour les deux cas extrêmes en terme de diamètre d'exploitabilité (60 cm et 80 cm) et pour une sylviculture moyenne (RDI = 0,7), les valeurs de stockage moyen sont de 18,0 tC/ha (resp. 22,2 tC/ha) pour la biomasse racinaire, 83,9 tC/ha (resp. 100,7 tC/ha) pour la biomasse aérienne et 10,1 tC/ha (resp. 11,4 tC/ha) dans les produits pour le diamètre d'exploitabilité 60 cm (resp. 80 cm). Le compartiment sol représente dans les deux cas 85,9 tC/ha.

La répartition en produits forestiers n'est pourtant pas la même dans les deux cas (figure B15). Avec un diamètre d'exploitabilité de 60 cm les arbres sont globalement moins gros qu'avec le diamètre d'exploitabilité de 80 cm. Il y aura alors plus de produits dans la filière construction que dans la filière ameublement (cf. règles de répartition du paragraphe A.III). Cependant, les durées de vie apparentes moyennes sont de 8,5 ans pour la filière ameublement, et de 9,1 ans pour

la filière construction. Le transfert entre les deux filières est alors assez neutre en termes de stock moyen.

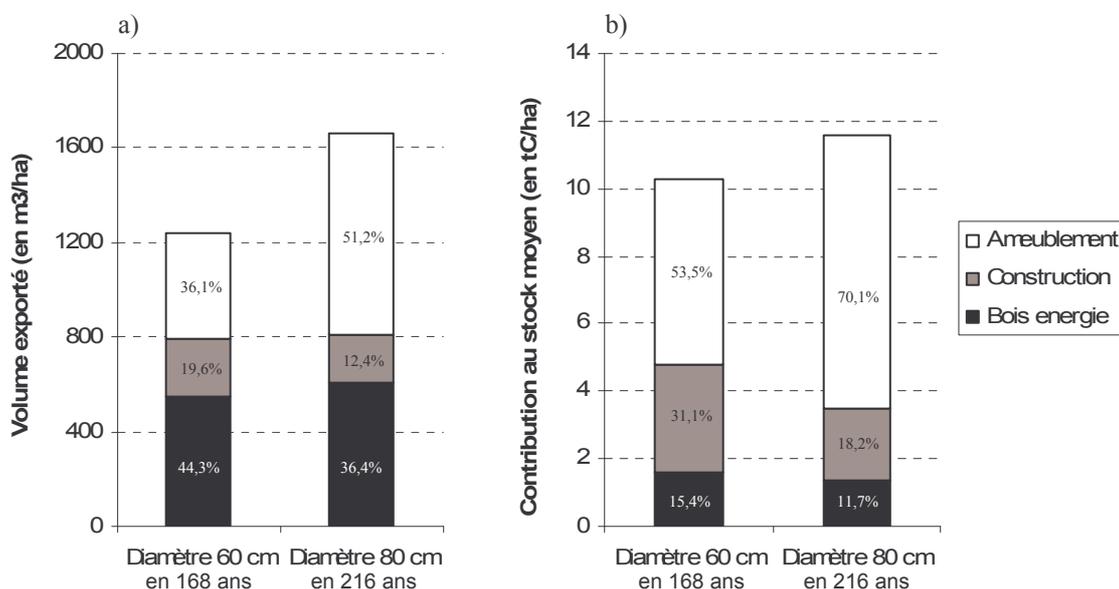


Figure B15 : Produits issus de deux sylvicultures (diamètres d'exploitabilité de 60 et 80 cm)
a) Volume total exporté sur l'ensemble de la révolution (en m³/ha)
b) Contribution au stock de carbone moyen (en tC/ha)

En revanche, fixer des diamètres d'exploitabilité élevés induit des sylvicultures plus longues pour les obtenir. Il s'ensuit alors que le peuplement reste plus longtemps à l'état mature, qui est celui qui présente le plus fort stock. Ce phénomène explique le stock légèrement supérieur pour les diamètres d'exploitabilité élevés.

1.2 – 2. Cas du Hêtre

La démarche dans le cas du Hêtre est identique à celle du Chêne. Les mêmes analyses sont alors effectuées dans ce paragraphe. Dans un premier temps, les résultats des stocks moyens en régime permanent sont étudiés pour différentes sylvicultures dans trois cas de fertilités différentes. L'influence du diamètre d'exploitabilité est appréhendée ensuite dans le cas de la bonne fertilité (classe intermédiaire).

Une précision est à apporter quant aux fertilités observées dans le cas du Hêtre. Des changements de productivité sur le XX^e siècle ont été démontrés pour le Nord-Est de la France (Spiecker *et al.* 1996, Dhôte *et al.* 2000a). Une étude a permis de les quantifier (Bontemps *et al.* 2005b) et d'en intégrer les conséquences dans le simulateur *Fagacées*.

L'indice de fertilité utilisé pour le Hêtre ne peut plus être seulement une hauteur dominante à un âge donné. Il faut également renseigner la date d'observation de cette fertilité. En effet, si par exemple un peuplement de Hêtre a une hauteur dominante de 30 mètres à 100 ans observée en 1900, les changements de productivité du XX^e siècle induisent que sur cette station, la hauteur d'un peuplement de 100 ans en 2000 sera plus élevée.

Pour choisir les fertilités des simulations, nous nous baserons comme pour le Chêne sessile sur les recommandations du Bulletin Technique de l'ONF (Duplat et Roman-Amat 1996) qui

propose 22 mètres, 27 mètres et 32 mètres à 100 ans pour les peuplements de fertilité faible, bonne et très bonne. On considérera que ces fertilités sont observées en 1950.

La donnée du triplet âge / hauteur dominante / date permet de renseigner une fertilité intrinsèque de la station, et l'année de naissance du peuplement doit également être indiquée. On utilisera l'année 1950 comme date de naissance des peuplements de Hêtre pour les simulations puisqu'on s'intéresse au devenir des peuplements à venir. Notons que dans le simulateur *Fagacées*, l'effet date pour les années postérieures à 2000 est fixé au niveau de 2000.

Dans ces conditions, les hauteurs dominantes de 22 mètres, 27 mètres et 32 mètres observées à 100 ans en 1950 induisent des peuplements à 100 ans en 2050 de 27,2 mètres, 32,3 mètres et 37,3 mètres. Cela correspond environ au gain d'une classe de productivité.

1.2 – 2.1. Influence de la densité et de la fertilité des peuplements

Comme dans le cas du Chêne sessile, un itinéraire sylvicole est entièrement défini par un couple (RDI initial ; RDI final). Les RDI dans le cas du Hêtre peuvent être inférieurs à ceux du Chêne sessile. On prendra alors des valeurs variant dans la gamme 0,4 – 0,9. Une autre différence entre les sylvicultures de ces deux feuillus est l'objectif sylvicole qui est l'obtention d'un diamètre d'exploitabilité de 60 cm pour le Hêtre.

1.2 – 2.1.1 Bilans de carbone en fonction de la densité pour trois fertilités

La figure B16 présente les stocks moyens de carbone sur l'ensemble de la révolution pour tous les cas possibles de sylvicultures, définis par un couple (RDI initial ; RDI final), et pour les trois fertilités définies ci-avant. Les âges des simulations correspondantes sont indiqués dans le tableau B4.

<i>Fertilité</i>	<i>Age minimum</i>	<i>Age maximum</i>
Faible (22 m à 100 ans en 1950)	126 ans	228 ans
Bonne (27 m à 100 ans en 1950)	102 ans	192 ans
Très bonne (32 m à 100 ans en 1950)	84 ans	153 ans

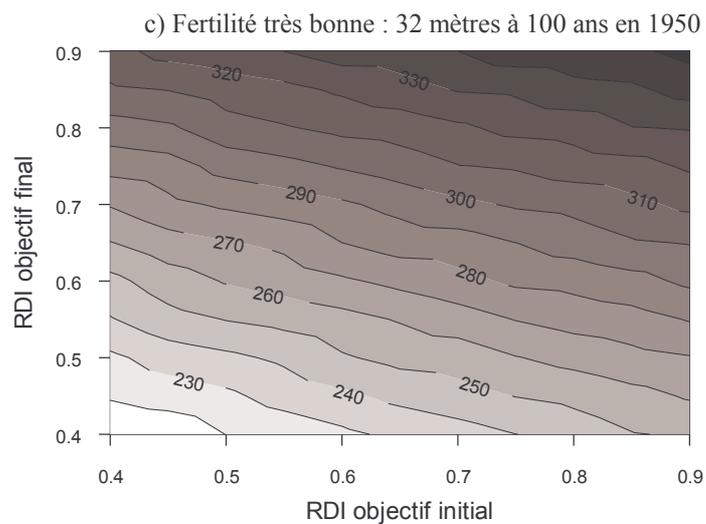
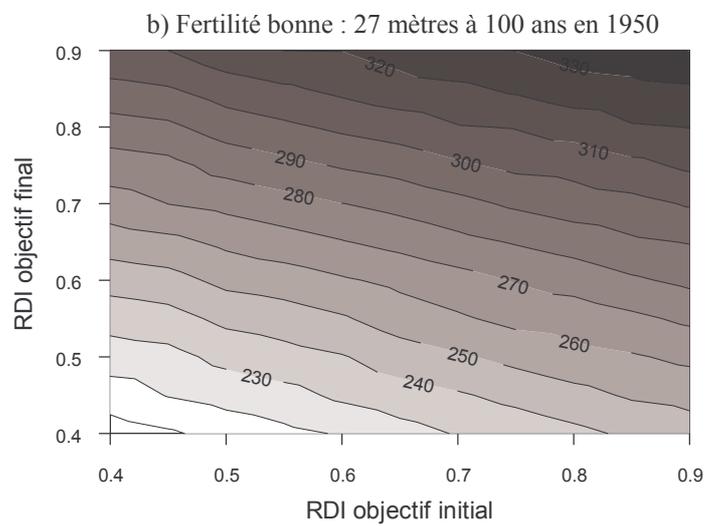
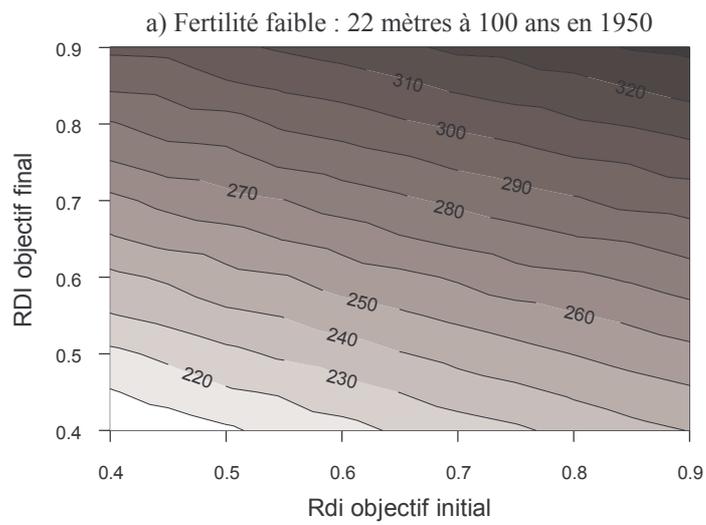
Tableau B4 : Ages nécessaires pour l'obtention du diamètre d'exploitabilité 60 cm

Les moyennes de stock de carbone sont beaucoup plus élevées pour le Hêtre que pour le Chêne sessile, puisqu'on obtient des gammes de valeurs entre les densités les plus faibles (RDI initial = RDI final = 0,4) et les plus fortes (RDI initial = RDI final = 0,9) de 202 tC/ha à 332 tC/ha pour la fertilité faible, de 205 tC/ha à 340 tC/ha pour la fertilité intermédiaire, et de 211 tC/ha à 353 tC/ha pour la meilleure fertilité.

Les mêmes constats sont à faire que dans le cas du Chêne sessile :

- Les stocks moyens les plus élevés sont obtenus lorsque le peuplement a la densité la plus forte du début à la fin (RDI initial = RDI final = 0,9)
- Les stocks moyens les plus faibles sont obtenus pour les densités les plus faibles (RDI initial = RDI final = 0,4)
- Le stock de carbone est plus sensible au RDI final qu'au RDI initial
- L'influence de la fertilité est faible en comparaison de celle de l'intensité de la sylviculture

Les explications de ces phénomènes sont les mêmes que dans le cas du Chêne sessile.



Figures B16 : Stocks de carbone moyens (en tC/ha) en fonction de la sylviculture pour des peuplements de Hêtre pour les fertilités a) faible, b) bonne et c) très bonne

I.2 – 2.1.2 Répartition des stocks pour une situation type

La situation choisie pour comparer les répartitions de stock entre les compartiments est de nouveau la fertilité intermédiaire (bonne).

Avec une sylviculture très dynamique (RDI initial = RDI final = 0,4), le sol représente à lui seul 59,8% du stock moyen sur l'ensemble de la révolution, alors qu'il n'est que de 36,1% pour le scénario dense (figure B17). Cette baisse du pourcentage n'est pas due à une baisse du stock dans le sol, mais à une augmentation des autres compartiments.

De nouveau, on observe que les produits représentent une part très minime du stockage moyen avec seulement 5,1% pour le scénario clair et 3,7% pour le scénario dense. La part la plus variable du stockage se trouve dans la biomasse aérienne (Hêtre clair : 28,9% ; Hêtre dense : 51,0%).

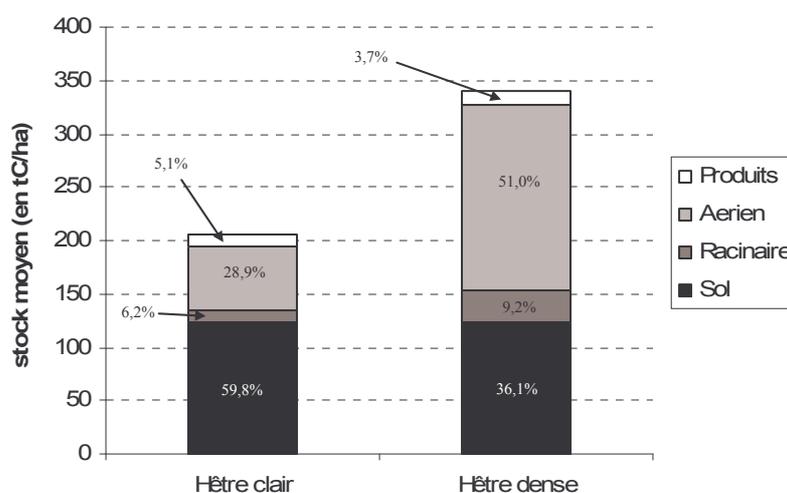


Figure B17 : Répartition du stock moyen de carbone dans les différents compartiments pour deux sylvicultures de Hêtre de fertilité bonne (27 m à 100 ans en 1950)
Hêtre clair : RDI initial = RDI final = 0,4 ; Hêtre dense : RDI initial = RDI final = 0,9

Le bois de Hêtre exporté de la forêt est utilisé dans quatre des cinq filières décrites dans le paragraphe A.III : bois énergie, pâte à papier, emballage et ameublement. Dans les simulations, les filières bois énergie et pâte à papier, ayant des durées de vie très proches sont confondues.

La répartition des produits dans ces filières pour les scénarios clair et dense est illustrée figure B18. Comme dans le cas du Chêne sessile, le scénario dense permet d'exporter environ deux fois plus de bois que le scénario clair, mais en près de deux fois plus de temps (192 ans contre 102 ans). Les volumes annuels moyens sont légèrement favorables au scénario dense.

Il pourrait paraître surprenant que le scénario dense produise en pourcentage moins de petits bois (bois de feu et pâte à papier) que le scénario clair. Cela est dû au fait que l'ensemble des éclaircies plus la coupe finale sont cumulées dans ce bilan, et que beaucoup de petits arbres sont récoltés au cours des éclaircies intermédiaires dans le scénario clair. En revanche, dans le scénario dense, plus d'arbres sont conservés et donnent de gros bois.

Dans ces bilans, il apparaît que le bois de la filière ameublement qui représente environ un tiers des volumes contribue pour près de deux tiers au stockage dans les produits en raison de la durée de vie supérieure aux autres filières.

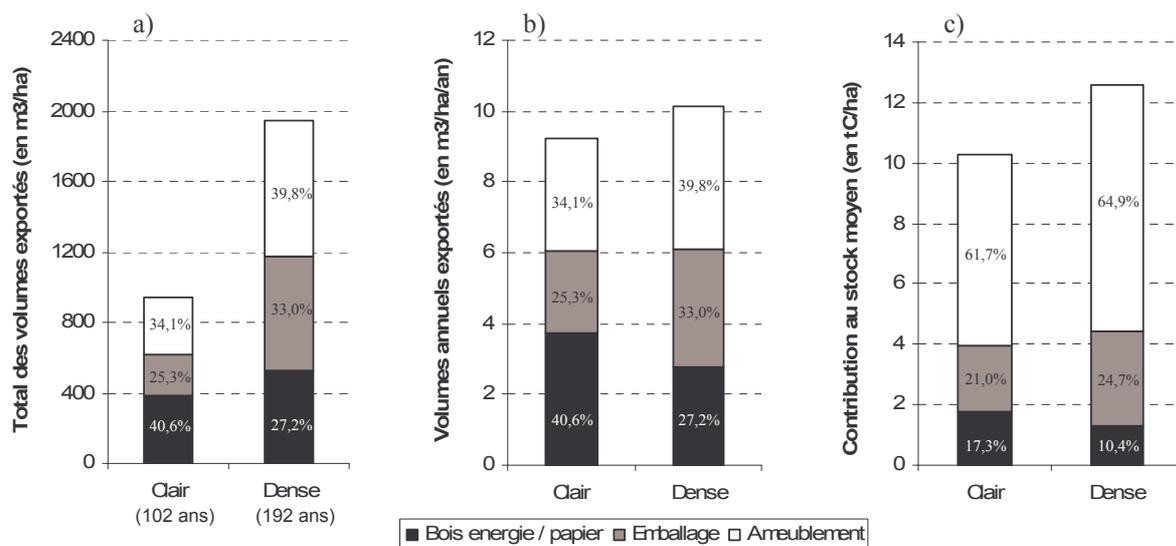


Figure B18 : Produits issus des sylvicultures claire et dense pour le Hêtre

a) Volume total exporté sur l'ensemble de la révolution (en m³/ha)

b) Volumes annuels exportés (en m³/ha/an)

c) Contribution au stock de carbone moyen (en tC/ha)

Les révolutions sont de 102 ans pour le scénario clair, 192 ans pour le scénario dense

1.2 – 2.2. Influence du diamètre d'exploitabilité

Dans le cas du Hêtre également le diamètre d'exploitabilité peut avoir une influence sur le stock de carbone. Duplat et Roman-Amat (1996) indiquent que le diamètre minimal d'exploitabilité est de 50 cm et le diamètre maximal de 70 cm.

Des simulations en faisant varier les diamètres objectifs dans cette gamme et à RDI constant sur toute la durée de la révolution (RDI initial = RDI final) sont effectuées et donnent les résultats présentés figure B19. Cette analyse est menée pour la classe de fertilité intermédiaire, c'est-à-dire pour une hauteur dominante de 27 mètres à 100 ans observée en 1950. L'année de naissance des peuplements est comme dans le paragraphe précédent 1950.

Les stocks maximaux sont obtenus pour les diamètres d'exploitabilité et les RDI les plus élevés. Pour les RDI faibles, le constat est identique à celui du Chêne sessile : le stock de carbone moyen est bien plus sensible au RDI qu'au diamètre d'exploitabilité. En revanche, plus le RDI augmente, plus le diamètre objectif influe sur le stock de carbone. Pour des sylvicultures peu dynamiques, le diamètre dominant augmente lentement et la forme concave de sa courbe en fonction de l'âge (figure B20) implique des révolutions d'autant plus longues que la sylviculture est peu dynamique. Les peuplements restent alors plus longtemps au stade mature qui est celui de plus fort stock de carbone. Il faut noter qu'en pratique, l'inverse est choisi : lorsque les peuplements poussent lentement (en raison de la sylviculture ou d'une faible fertilité), les diamètres d'exploitabilité choisis sont réduits.

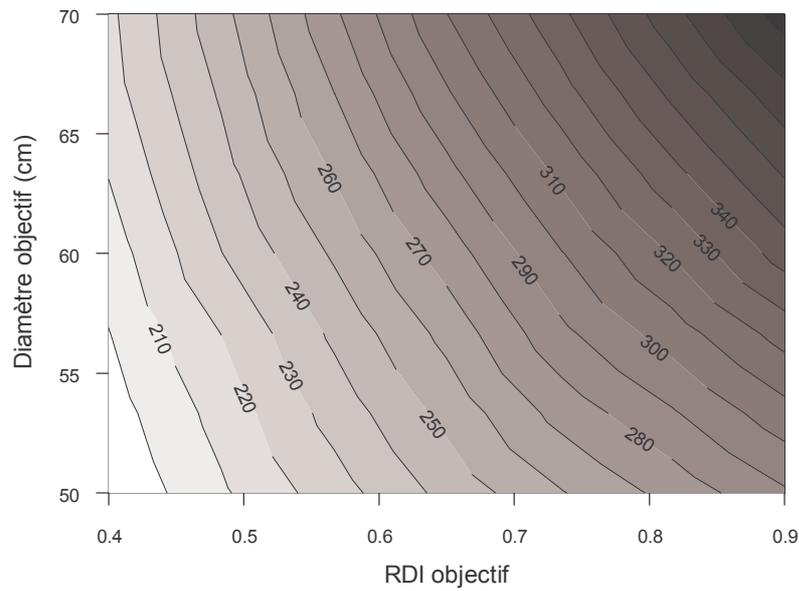


Figure B19 : Stocks de carbone moyens (tC/ha) en fonction du diamètre objectif d'exploitabilité et de la densité du peuplement (RDI objectif = RDI initial = RDI final)

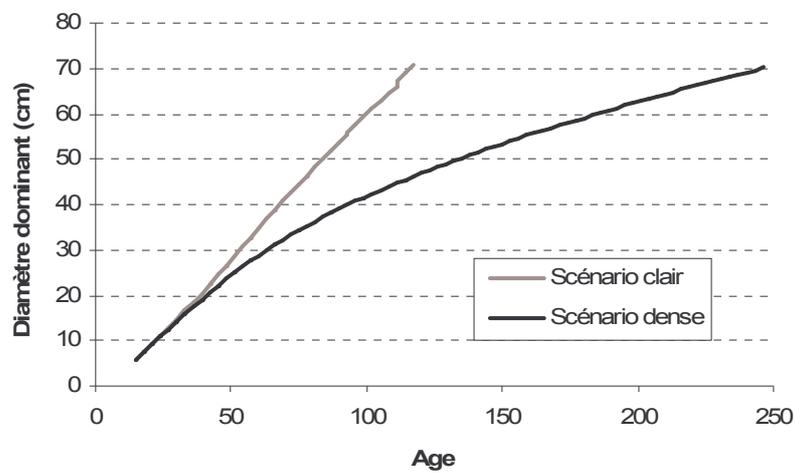


Figure B20 : Evolution du diamètre dominant en fonction de l'âge du peuplement pour une sylviculture dynamique (RDI initial = RDI final = 0,4) et une sylviculture très peu dynamique (RDI initial = RDI final = 0,9) pour un peuplement de Hêtre de bonne fertilité (27 m à 100 ans en 1950)

Les répartitions dans les différentes filières pour les diamètres d'exploitabilité extrêmes sont très différentes. Dans le cas de la bonne fertilité (27 mètres à 100 ans en 1950), et avec un itinéraire sylvicole moyen (RDI initial = RDI final = 0,6), on observe une inversion des pourcentages de volumes exportés entre les filières emballage et ameublement (figure B21). En effet, les billons de diamètre milieu entre 20 et 39 cm sont intégralement affectés à la filière emballage, alors que les billons plus gros approvisionnent la filière ameublement (cf. règles de répartition §A.III). Avec un diamètre d'exploitabilité plus gros, la filière ameublement est alors favorisée, ce qui augmente le stock moyen en raison de sa plus grande longévité.

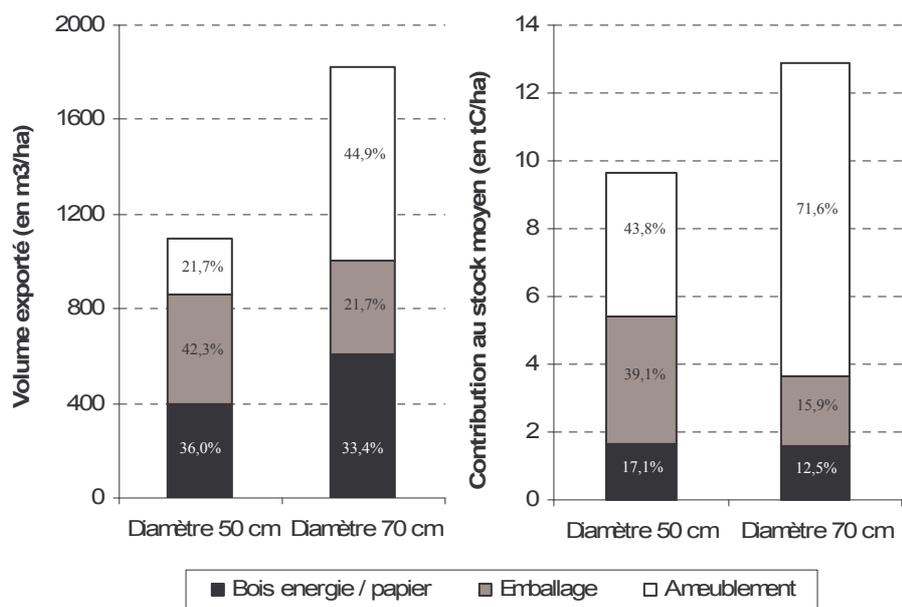


Figure B21 : Produits issus de deux sylvicultures pour le Hêtre :
diamètres d'exploitabilité de 50 cm (en 114 ans) et 70 cm (en 180 ans)
a) Volume total exporté sur l'ensemble de la révolution (en m³/ha)
b) Contribution au stock de carbone moyen (en tC/ha)

I.3 – Etude du régime transitoire

L'étude du régime transitoire est l'appréhension des cinétiques de variations de stocks de carbone lorsqu'on se déplace des conditions du régime actuel, considéré comme permanent.

Les taux de coupe sont déjà ralentis dans les forêts françaises. Quel serait l'impact immédiat en terme de stockage de carbone d'un arrêt total des prélèvements dans les forêts jeunes et claires jusqu'à atteindre un niveau très dense du stock ? La simulation de ce type d'itinéraire sylvicole montre le stockage maximum qu'il est possible d'effectuer en forêt en un minimum de temps.

Cette analyse est menée sans prendre en compte les aspects économiques, sociaux ou environnementaux qui seraient affectés par de telles pratiques. Dans le cas d'une prise de décision politique, il est parfaitement indispensable de traiter ces points également mais ils ne doivent pas influencer la question scientifique des bilans de carbone qui est l'objet de cette étude.

L'analyse du régime transitoire est montrée dans un cas particulier afin de présenter la méthode, mais l'analyse exhaustive en combinant toutes les situations n'est pas menée.

I.3 – 1. Scénario simulé

La figure B22 indique une situation type : il s'agit d'un peuplement de Chêne sessile de bonne fertilité (25 mètres à 100 ans) conduit avec une sylviculture dynamique jusqu'à 60 ans (RDI = 0,5), et pour lequel on décide d'arrêter les prélèvements jusqu'à obtenir un peuplement dense (RDI = 0,9). Le scénario dynamique - que l'on appelle « scénario initial », en gris sur la figure - est poursuivi pour effectuer la comparaison, et estimer le stockage différentiel, que l'on appellera le « surstockage ». Le scénario de capitalisation, en noir sur la figure, est appelé « scénario alternatif ».

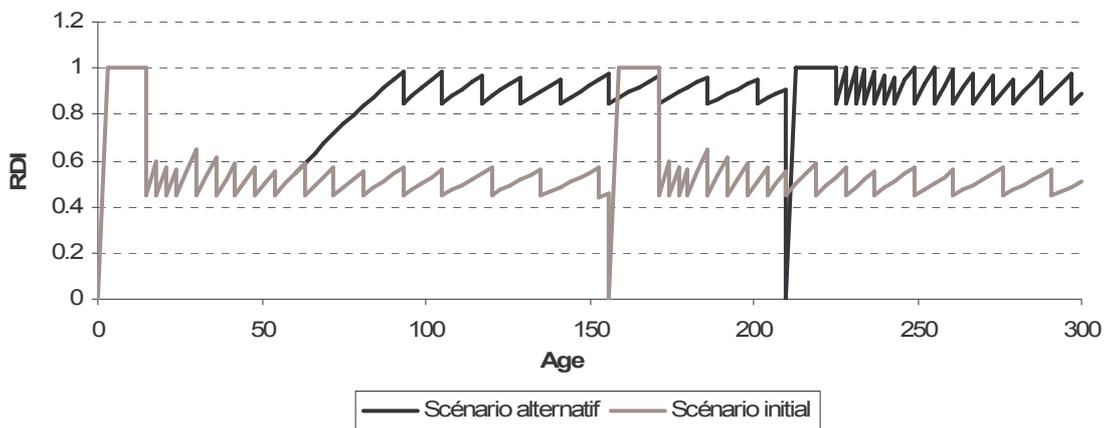


Figure B22 : Evolution des RDI pour le scénario initial et le scénario alternatif

Le scénario initial a une révolution de 156 ans. Un nouveau peuplement est ensuite installé, conduit avec la même sylviculture, c'est-à-dire un RDI objectif de 0,5 à partir de 15 ans et jusqu'à la fin de la révolution (diamètre objectif de 70 cm).

Le scénario alternatif commence identiquement au scénario initial, mais à partir de 60 ans, plus aucune éclaircie n'est effectuée avant d'atteindre de RDI objectif seuil de 0,95 (93 ans). Le scénario alternatif est conduit ensuite de manière dense (RDI initial = RDI final = 0,9), ce qui

induit une révolution de 210 ans. Ensuite, un nouveau peuplement est installé, conduit dès le départ avec une sylviculture dense.

L'évolution des caractéristiques des peuplements est donnée dans les figures B23 a) et b).

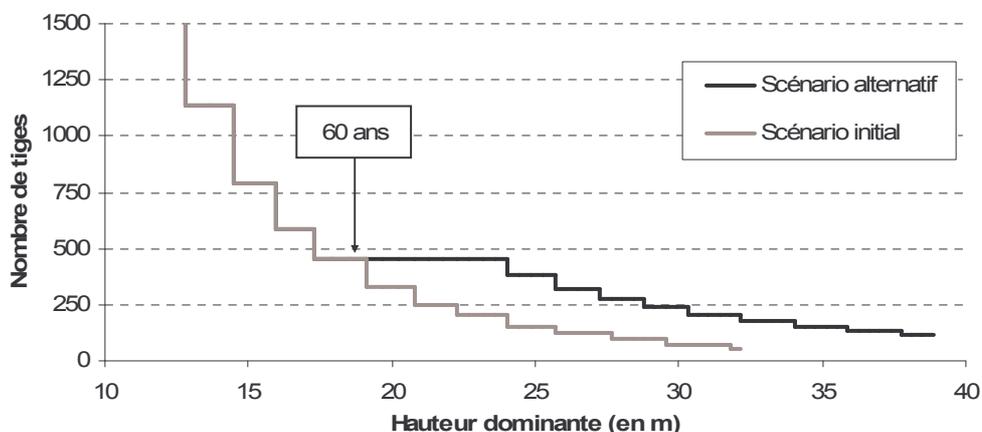


Figure B23 a) : Nombre de tiges en fonction de la hauteur dominante pour les scénarios initial et alternatif

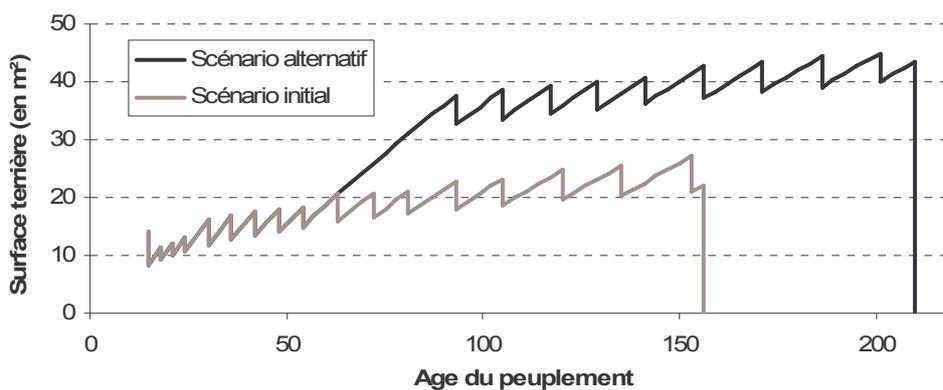


Figure B23 b) : Surface terrière du peuplement en fonction du temps pour les scénarios initial et alternatif

1.3 – 2. Evolution des stocks de carbone

Choisir un scénario sylvicole alternatif où aucune éclaircie n'est effectuée avant d'atteindre une densité proche du maximum autorisé par la loi d'auto-éclaircie engendre un surstockage de carbone pendant un certain nombre d'années (figure B24). Lorsqu'à 60 ans les prélèvements sont stoppés dans le scénario alternatif, il va y avoir une capitalisation rapide d'environ 60 tC/ha en 33 ans, jusqu'à obtention d'un peuplement dense. Des éclaircies sont alors de nouveau effectuées, mais le stockage du carbone reste encore favorable au scénario alternatif.

Ensuite, à 156 ans, le scénario initial atteint le diamètre objectif de 70 cm, et la coupe finale a lieu, ce qui entraîne un fort destockage de carbone. Le scénario alternatif n'ayant pas atteint le diamètre d'exploitabilité, le différentiel de stock de carbone lui est très fortement favorable.

Enfin, la coupe finale du scénario alternatif intervient à 210 ans, et le stock de carbone passe alors en-dessous de celui du scénario initial.

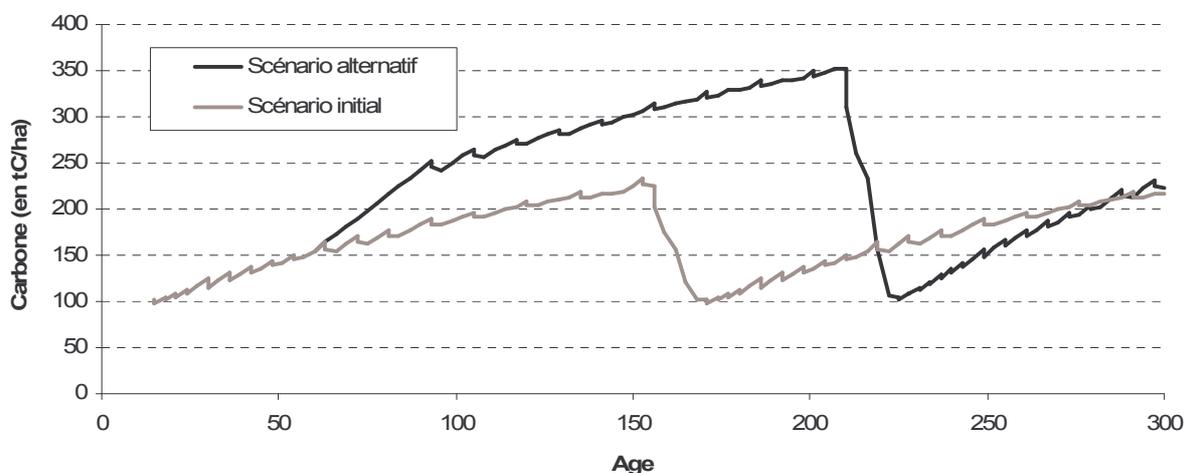


Figure B24 : Evolution des stock de carbone (tC/ha) pour un exemple de régime transitoire

On s'intéresse alors à la vitesse moyenne de surstockage induite par ce changement. Pour cela, on considère la différence entre les deux courbes d'évolution du carbone (figure B25). Celle-ci est très accidentée en raison essentiellement des âges d'éclaircies qui ne sont pas les mêmes pour les deux scénarios. On définit la vitesse annuelle moyenne (en tC/ha/an) de surstockage comme le rapport du différentiel de stock de carbone par la durée écoulée depuis l'âge de 60 ans. Elle est donnée figure B26.

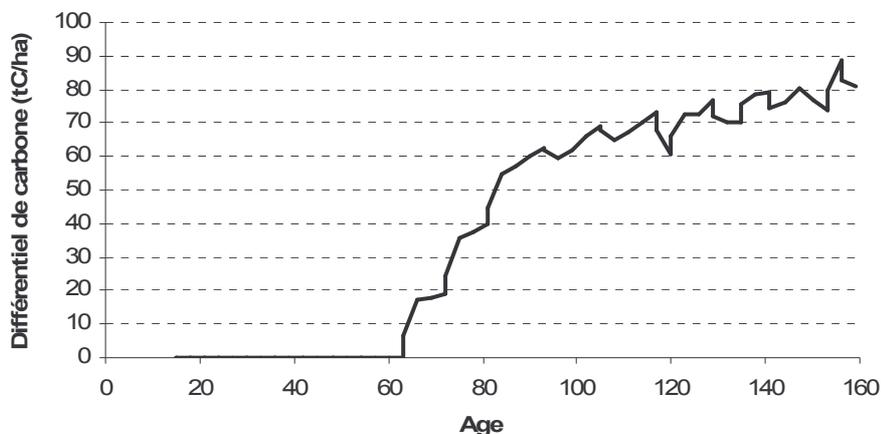


Figure B25 : Evolution de la différence de stock de carbone (tC/ha) entre le scénario initial et le scénario alternatif

Aux accidents près de la courbe, la vitesse moyenne de surstockage est maximale pendant les 33 années qui suivent la décision de choisir le scénario de capitalisation. Elle est d'environ deux tonnes de carbone par hectare et par an. Ensuite, le surstockage diminue fortement (figure B25) et la vitesse annuelle moyenne diminue alors graduellement. Au bout de 50 ans, elle est d'environ 1,3 tC/ha/an (Rappelons qu'il s'agit bien de vitesses annuelles moyennes par rapport à l'année où le peuplement a 60 ans, et non de vitesses instantanées), et le surstockage est approximativement de 67 tC/ha.

Cette valeur de 67 tC/ha de surstockage en 50 ans est à comparer aux stocks moyens obtenus lors de l'étude du régime permanent. Dans le cas d'un peuplement de Chêne sessile de fertilité 25 mètres à 100 ans, les stocks moyens étaient pour le scénario clair (RDI initial = RDI final = 0,5) de 170 tC/ha, et pour le scénario dense (RDI initial = RDI final = 0,9) de 248 tC/ha. La différence entre les deux était donc de 78 tC/ha en moyenne. Il est alors intéressant de noter qu'au bout de 50 ans, près de 86% de cette valeur moyenne est déjà surstockée par le scénario alternatif.

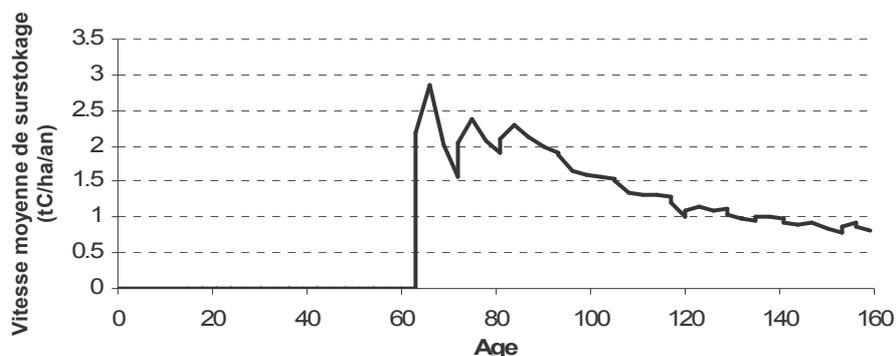


Figure B26 : Vitesse moyenne de surstockage (tC/ha/an)

Cette analyse est effectuée pour une situation type, c'est-à-dire un peuplement de Chêne sessile de fertilité moyenne, et pour lequel le scénario alternatif est déclenché à partir de 60 ans. Beaucoup d'autres situations sont bien sûr envisageables. Dans le cas d'une volonté de stocker très rapidement beaucoup de carbone en forêt, il est nécessaire de travailler à l'échelle du massif forestier et non à l'échelle de la parcelle comme dans cette étude.

A l'échelle du massif forestier, l'âge du peuplement utilisé précédemment est remplacé par une distribution d'âges, de même que la fertilité est remplacée par une distribution de fertilités. Les deux ne sont d'ailleurs pas nécessairement indépendants puisque suite à la déprise agricole les surfaces occupées par les forêts ont environ doublé depuis 1800 (Koerner *et al.* 2000, Dupouey *et al.* 2002) et que les anciens sol agricoles sont plus fertiles que les sols déjà forestiers avant 1800. Enfin, les RDI des scénarios initiaux aussi sont différents d'un peuplement à un autre.

Il ne serait pas très utile dans cette étude d'énumérer toutes les situations possibles. En revanche, le simulateur *Fagacées* dispose désormais des outils de calcul des différents compartiments du carbone et permettrait d'effectuer ce type d'étude à l'échelle d'un massif pour lequel on connaîtrait les conditions initiales.

I.4 – Discussion

I.4 – 1. Bilan

Les simulations de scénarios sylvicoles de capitalisation sur pied montrent que cette stratégie présente un intérêt non négligeable pour le piégeage du carbone. Le tableau B5 fait une synthèse des stocks moyens de carbone sur l'ensemble de la révolution obtenus en régime permanent pour trois classes de fertilités et pour les scénarios les plus extrêmes.

	<i>Fertilité</i>	<i>Scénario très clair</i>	<i>Scénario très dense</i>	<i>Différentiel</i>
<i>Chêne sessile</i>	Faible	161 tC/ha	232 tC/ha	71 tC/ha
	Bonne	170 tC/ha	248 tC/ha	78 tC/ha
	Très bonne	178 tC/ha	264 tC/ha	86 tC/ha
<i>Hêtre</i>	Faible	202 tC/ha	332 tC/ha	130 tC/ha
	Bonne	205 tC/ha	340 tC/ha	135 tC/ha
	Très bonne	211 tC/ha	353 tC/ha	142 tC/ha

Tableau B5 : Stocks de carbone moyens en régime permanent pour le Chêne sessile et le Hêtre suivant différentes fertilités et pour deux scénarios sylvicoles très contrastés

Attention cependant : les scénarios très clairs et très denses présentés dans ce tableau sont des itinéraires sylvicoles extrêmes. Tous les peuplements actuels de Chêne sessile et de Hêtre ne doivent pas être considérés comme présentant d'ores et déjà ces sylvicultures et il serait absolument faux de vouloir multiplier les différentiels reportés ici par les surfaces observées pour donner une idée des potentiels de stockage par capitalisation sur pied à l'échelle de la ressource nationale. De plus, rappelons de nouveau que le choix de capitaliser le carbone en forêt ne serait pas neutre aux niveaux social, économique et environnemental.

Pour replacer ces valeurs dans leur contexte, rappelons que les émissions de CO₂ de la France pour l'année 1990 sont estimées à 372,2 MtCO₂ (CITEPA 1994, cité dans Mortier 1995), ce qui, compte tenu des masses molaires du carbone et de l'oxygène, correspond à des émissions pour l'année 1990 de 101,8 MtC. Le passage du régime permanent d'un hectare de Chêne sessile ou de Hêtre d'une sylviculture très claire à une sylviculture très dense représente alors approximativement un millionième des émissions de CO₂ de l'année 1990. L'étude du régime transitoire indiquera en combien de temps cette absorption a lieu.

Afin de donner une estimation des potentialités de stockage à l'échelle de la ressource nationale, il faudrait travailler sur de grands massifs forestiers en connaissant les distributions de densité, d'âges, et de fertilité de chacune de deux essences. Un couplage du simulateur avec les données de l'IFN pourrait peut-être donner ce type de résultats en simulant la croissance de chacune des classes d'âge et de fertilité.

L'étude du régime transitoire sur un cas particulier montre qu'il est probable que le nouvel équilibre soit atteint assez rapidement, dans un temps bien inférieur à celui de la révolution forestière.

I.4 – 2. Comparaison Chêne sessile – Hêtre

Les démarches sont les mêmes pour le Chêne sessile et le Hêtre. Pourtant, on observe de fortes différences de stock de carbone entre les deux plus grands feuillus sociaux de France : avec une fertilité moyenne les gammes vont de 170 tC/ha à 248 tC/ha pour le Chêne sessile alors qu'elles vont de 205 tC/ha à 340 tC/ha pour le Hêtre. De plus, la valeur basse pour le Hêtre est obtenue pour une sylviculture encore plus dynamique que celle du Chêne (RDI = 0,4 contre 0,5).

Cette valeur de stock beaucoup plus élevée pour le Hêtre est le résultat de deux raisons convergeant dans le même sens.

D'abord, la valeur retenue pour le carbone du sol est égale à 122,7 tC/ha pour le Hêtre, alors qu'elle n'est que de 85,9 tC/ha pour le Chêne sessile. Dans la mesure où pour ces simulations, le stock dans le sol est considéré être constant, cela fait une différence systématique de 36,8 tC/ha uniquement pour ce compartiment.

Ensuite, les peuplements de Hêtre sont globalement plus hauts que ceux de Chêne sessile. L'indice de fertilité utilisé est de 25 mètres à 100 ans pour la classe intermédiaire du Chêne, alors qu'il est de 27 mètres à 100 ans observés en 1950 pour le Hêtre, donc plus haut encore à 100 ans en 2050 en raison des changements de productivité observés (Bontemps *et al.* 2005b). Les courbes de croissance en hauteur dans ces deux cas sont présentées figure B27 pour les deux essences. À 150 ans, le Hêtre a presque atteint 40 m alors que la hauteur dominante du Chêne sessile est de 31,4 m. Le volume d'un arbre étant approximativement proportionnel à sa hauteur (Vallet *et al.* 2005), cette différence engendre un stock dans la biomasse plus élevé dans le cas du Hêtre que celui du Chêne.

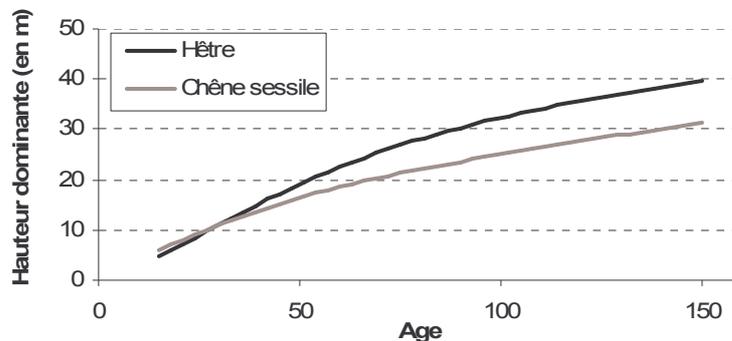


Figure B27 : Hauteurs dominantes du Chêne sessile et du Hêtre pour les fertilités intermédiaires

Notons que la densité du bois n'intervient pas dans la différence entre les deux essences. En effet, les modèles utilisés pour les deux essences sont difficilement comparables directement, mais on peut estimer l'infradensité moyenne du bois sur l'ensemble du peuplement en divisant le stock de carbone de la partie aérienne du peuplement par le volume et par le taux de carbone dans la matière sèche. On obtient alors une infradensité moyenne pour le Hêtre de 0,5 tMS/m³, et de 0,51 tMS/m³ pour le Chêne sessile. Nepveu, dans la monographie du Hêtre (Tessier du Cros 1981) synthétise des résultats proches.

1.4 – 3. Place des produits forestiers

La part des produits forestiers dans les stocks de carbone est très faible avec seulement 5 % du stock moyen en régime permanent environ. Deux facteurs expliquent ce constat.

Le premier est le référentiel : les révolutions forestières les plus courtes sont de 84 ans, dans le cas d'une très bonne fertilité et d'une sylviculture extrêmement dynamique pour le Hêtre. A l'inverse, la révolution la plus longue des simulations est de 255 ans pour un peuplement de Chêne peu fertile et très dense. Le référentiel par rapport auquel on compare la longévité des produits forestiers est alors un compartiment qui peut lui-même avoir une longévité de plus de deux siècles.

Le second facteur a déjà été abordé dans le paragraphe A.III. Les durées de vies des filières sont des durées de vie apparentes, c'est-à-dire des espérances de vie d'un billon exporté de la forêt, et non celle d'un produit fini. Or le rendement de la première transformation est d'environ 50%, et celui de la seconde transformation est plus variable, mais approximativement de 70%. La part du billon devenant un produit fini est donc d'environ 35% seulement, les 65% restants sont des co-produits de faible longévité.

Enfin, un élément supplémentaire peut altérer le jugement et rendre ce résultat contraire aux *a priori* : lorsque les produits forestiers sont évoqués, les idées reçues nous montrent les poutres des vieilles maisons ou les armoires de grand-mères. Ces produits là ont des durées de vie extrêmement longues mais ne sont qu'une infime partie du bois exporté de la forêt.

A titre d'exemple, dans le cas d'un peuplement de Chêne de fertilité et de sylviculture moyennes, seulement 14% environ des volumes exportés sont affectés à la filière construction. Ce volume va subir la première transformation qui va générer 51% de pertes. Les 7% du volume restant sont répartis dans différentes sous-filières, et il ne restera alors que 1,6% dans la sous-filière la plus longévive qu'est la charpente. Dans cette filière, il y a 20% de pertes lors de la seconde transformation, d'où un pourcentage final en charpentes de 1,29% du volume exporté de la forêt. Enfin, cette fraction a une longévité de 40 ans seulement, car les charpentes ne sont pas seulement celles des maisons individuelles, mais aussi celles des charpentes industrielles qui ont des durées de vie plus courtes.

Cet exemple illustre le décalage entre les idées reçues quant au stockage du carbone dans la charpente en comparaison avec la longévité des billons sortis de la forêt. S'il est moins marqué, le phénomène est identique dans le cas de l'ameublement. Une part infime des volumes exportés de la forêt devient des meubles massifs.

Cette analyse ne signifie pas que le stockage dans les produits forestiers est inutile, mais seulement qu'il est faible en comparaison de celui des stocks sur pied de la forêt.

Par ailleurs, dans le cadre d'incitations politiques pour le stockage du carbone dans les produits forestiers, les leviers disponibles ne sont pas relatifs au processus afin d'augmenter les rendements matière dans la mesure où l'objectif évident des scieurs et déjà d'éviter au maximum les pertes. En revanche, ils pourraient être de teneur à augmenter la durée de vie apparente de ces filières.

Cette durée de vie apparente pourrait être augmentée par deux moyens : le premier est une favorisation des sous-filières les plus longévives. Par exemple, la sous-filière charpente ne reçoit que 11,5% du volume affecté à la filière construction. Le transfert de volumes depuis d'autres sous-filières vers celle-ci pourrait augmenter considérablement la durée de vie apparente. Le deuxième moyen est l'augmentation la durée d'utilisation finale des produits. Par exemple, dans la filière ameublement, des mesures favorisant les meubles massifs seraient très certainement favorables aussi au stockage de carbone.

Chapitre II – Substitution d’essences

La deuxième stratégie sylvicole étudiée avec la chaîne de modèles est la substitution d’essences. Cela correspond au remplacement d’un peuplement de feuillus à croissance lente par une plantation de résineux à croissance rapide.

Si le résineux pousse plus rapidement que le feuillu, on peut s’attendre à ce que les accroissements de stocks de carbone soient supérieurs, et que cette pratique génère alors un puits de carbone plus fort. Cependant, il faut de nouveau tout prendre en compte, aussi bien les stocks dans la biomasse que le sol ou les produits forestiers.

Le Pin laricio et le Douglas sont deux essences résineuses très utilisées en reboisement en France. Le premier présente des avantages considérables, avec particulier une bonne plasticité qui lui permet de valoriser les sols pauvres, une croissance pouvant atteindre 20m³/ha/an, une rectitude remarquable, un bois de qualité reconnue (Riou Nivert *et al.* 2001). Le second est l’essence la plus utilisée en reboisement depuis au moins 35 ans (Goujon 1981, Melin et Riou-Nivert 1985, de Champs 1997). Goujon écrit en 1981 que depuis 1969, avec 10 000 ha de nouvelles plantations par an, il représente 25 à 30% de la totalité des surfaces reboisées chaque année. Cette essence est en particulier remarquable par sa très forte production. Le fait que 80% des douglasaies soient privées en France (de Champs 1997) est d’ailleurs un signe de la bonne valorisation de son bois.

D’autre part, ce changement de gestion sylvicole ne peut être envisagé que sur des zones dont les propriétés environnementales, en particulier pédologiques et climatiques, autorisent la croissance de la nouvelle essence. Les situations choisies, d’autant plus intéressantes à étudier que les gestionnaires forestiers les pratiquent déjà, sont la substitution de peuplements de Chêne sessile par des plantations de Pin laricio en régions Centre et Pays de la Loire, et celle du Hêtre par le Douglas sur les sols acides du Massif Central.

La situation la plus favorable en termes de stockage de carbone pour la substitution serait une station sur laquelle le peuplement de feuillus est peu productif et où le résineux aurait une bonne productivité. Il faut connaître en fonction des caractéristiques du milieu les fertilités différentielles des deux essences du couple de substitution. Quelles sont par exemple les fertilités comparées du Hêtre et du Douglas sur une station d’altitude dans le Limousin ?

Ce chapitre présente dans un premier temps les travaux effectués pour estimer les fertilités différentielles des deux couples d’essence Chêne sessile / Pin laricio et Hêtre / Douglas. Ensuite les comparaisons de pratiques sylvicoles seront largement détaillées.

II.1 – Fertilité différentielle

Pour analyser les fertilités différentielles de chacun des deux couples d'essences, les méthodes employées sont les mêmes : le recours aux données de l'IFN (Inventaire Forestier National) a permis d'estimer l'indice de fertilité pour une des deux essences du couple à partir des données dendrométriques mesurées par l'IFN, retraitées pour obtenir un couple (âge, H_0), puis positionnées dans un faisceau de courbes de croissance en hauteur dominante ; pendant que l'indice de fertilité de l'essence alternative est estimé par un modèle prenant en variables d'entrée les caractéristiques de la station mesurées par l'IFN.

L'exploitation des données de l'IFN a été menée avec l'aide précieuse, patiente et efficace d'Ingrid SEYNAVE qui a déjà développé des outils d'analyse de ces données pour d'autres études sur les potentialités forestières des stations (Seynave *et al.* 2005b).

II.1 – 1. Couple *Chêne sessile* / *Pin laricio*

Compte tenu des travaux antérieurs (Duplat et Tran-Ha 1997), l'indice de fertilité utilisé dans le cas du *Chêne sessile* est la hauteur dominante (hauteur des 100 plus gros arbres à l'hectare) du peuplement ramenée à l'âge de 100 ans. L'indice pour le *Pin laricio* est la hauteur dominante à 30 ans. Il est alors nécessaire de pouvoir estimer ces deux indices sur des stations identiques.

La fertilité du *Pin laricio* a déjà été étudiée dans la région Centre (Lebourgeois 1995), et une clef de détermination de la fertilité en fonction des conditions du milieu a été établie par Gilbert *et al.* (1996).

Cette clef classe le secteur ligérien en 35 types de stations, dont 15 sont possibles pour les plantations de *Pin laricio*, les autres milieux sont à éviter. Pour chacun de ces types de stations, l'indice de fertilité pour le *Pin laricio* est renseigné. Les critères déterminants de la clef sont liés au type de sol (textures argileuses, calcaires, limoneuses ou sableuses), à l'hydromorphie, à la flore, ainsi qu'à des facteurs aggravants comme la présence de roche ou graviers, dont les équivalents sont disponibles dans les données IFN.

Il faut alors connaître l'indice de fertilité du *Chêne sessile* sur ces types de stations. Une requête sur la base de données IFN a permis d'obtenir tous les peuplements de *Chêne sessile* du secteur concerné, et les éléments de description du milieu permettant de les classer dans les types de la clef de détermination. D'autre part, les inventaires des circonférences, âges et hauteurs disponibles ont également été nécessaires à l'estimation de l'indice de fertilité du *Chêne*.

Cette requête a été effectuée avec les critères suivants :

- Zone géographique : Départements du Cher (18), Loir-et-Cher (41), Maine-et-Loire (49), Mayenne (53) et Sarthe (72)
- Les structures forestières : de type « Futaie régulière »
- Essence : peuplements à *Chêne sessile* prépondérant

706 relevés IFN correspondent à ces critères.

Afin d'estimer l'indice de fertilité de ces peuplements, la hauteur dominante a été calculée grâce aux hauteurs mesurées par l'IFN pour chaque placette (toutes les hauteurs des arbres échantillonnés sont mesurées). De plus, le protocole de l'IFN prévoit de carotter deux arbres par classe de diamètre (petits bois, moyen bois et gros bois), or les peuplements choisis sont classés en structure régulière par l'IFN et l'on considérera que les peuplements sont donc équiennes. Bien que cette hypothèse soit assez forte dans la mesure où ce classement est fait visuellement, on utilise ces carottages pour estimer l'âge dominant du peuplement. Ensuite, le couple hauteur / âge

obtenu a été utilisé pour positionner la placette dans un faisceau de courbes de croissance en hauteur pour le Chêne sessile (Duplat et Tran-Ha 1997) et calculer ainsi l'indice de fertilité.

D'autre part, les variables permettant de classer les stations dans les types de milieux de la clef de détermination de Gilbert ont également été fournies par l'IFN. En particulier, le relevé floristique complet est fourni par l'IFN, et il a été nécessaire de sommer les pourcentages des groupes de plantes acidiphiles (G8 dans la clef) et acidiphiles strictes (G9) afin de connaître leur niveau global. Les autres variables de la clef ont un équivalent dans les données IFN. Néanmoins, pour la présence d'hydromorphie, les classes de profondeur n'ont pas exactement les mêmes limites : le seuil de présence d'hydromorphie de la clef de détermination est 30 cm alors que la classe correspondante de l'IFN s'étend de 25 à 34 cm. Le seuil utilisé est alors 34 cm au lieu de 30 cm.

Au cours de ces calculs, un certain nombre de relevés de l'IFN n'ont pu être conservés, soit en raison de l'impossibilité de calculer l'âge dominant, soit par impossibilité de classer la station (données manquantes). Ces relevés étant écartés, il reste alors 440 peuplements. Le tableau B6 récapitule les indices de fertilité par type de station. Les informations correspondant au Chêne sessile sont issues des calculs sur les données IFN, et les informations sur le Pin laricio proviennent de Gilbert *et al.* (1996). La dernière colonne est la division de la fertilité du Pin laricio par celle du Chêne sessile.

La situation *a priori* la plus favorable au stockage de carbone pour la substitution du feuillu par le résineux correspond au ratio le plus élevé de la fertilité du Pin laricio par rapport à celle du Chêne sessile. Cependant, il faut aussi choisir des situations où le Chêne est suffisamment répandu pour être intéressantes. Il est également nécessaire que l'installation du Pin laricio soit possible : certains milieux ont été notés « à proscrire » ou « à éviter » soit en raison de la faible productivité, soit en raison du mauvais état sanitaire (un tiers des relevés avec 3 arbres ou plus montrant des défoliations sur la placette).

Avec ces critères, le compromis le meilleur semble est le type de station L7a de la clef de détermination, correspondant à une texture limoneuse, sans hydromorphie observée en dessus de 30 cm, présence faible de plantes acidiphiles, et avec soit une pluviométrie supérieure à 780 mm, soit un bas de pente, soit un replat.

Il est également intéressant de voir l'effet d'une substitution d'essence lorsque le ratio des fertilités est défavorable, à titre de comparaison. Avec les mêmes critères, le groupe choisi est alors le L3, présentant également une texture dominante limoneuse, mais avec des traces d'hydromorphie entre 0 et 30 cm, et toujours sans forte présence de plantes acidiphiles.

Ces deux groupes sont grisés dans le tableau B6. Dans le cadre de l'étude de la substitution du Chêne sessile par le Pin laricio en Pays de la Loire, les fertilités seront donc prises dans un premier cas à 24,2 mètres à 100 ans pour le Chêne et 15,7 mètres à 30 ans pour le Pin, et dans un second cas à 25,9 mètres à 100 ans pour le Chêne et 14,6 mètres à 30 ans pour le Pin.

Type de station Gilbert (1996)	Fertilité Chêne (H ₀ à 100 ans)	Ecart-type	Nb Observations Chêne	Fertilité Pin (H ₀ à 30 ans)	Nb Relevés Pins	Installation Pins	Rapport des fertilités Pin / Chêne
A2	26.7	--	1	12.8	5	A éviter	0.48
S1	23.8	--	1	11.8	11	Proscrire	0.50
C4	24.4	6.6	2	13.1	7	Limite	0.54
L3	25.9	4.1	64	14.6	14	Possible	0.56
L2	25.2	3.5	37	14.5	20	Possible	0.57
L6	24.6	4.1	58	14.3	55	Possible	0.58
S13	25.8	2.4	12	15.1	45	Possible	0.59
L7b	25.2	4.0	95	14.8	29	Proscrire	0.59
L1	22.3	--	1	13.5	10	Limite	0.61
S5	24.6	4.0	10	15.0	9	Possible	0.61
S7	25.2	4.6	25	15.5	8	Limite	0.61
S15	25.2	3.9	36	15.5	34	Possible	0.62
L4-L5	22.7	4.1	16	14.6	1	Limite	0.64
L7a	24.2	3.6	67	15.7	14	Possible	0.65
A4	21.7	3.4	8	15.3	10	Possible	0.70
A8	22.0	1.6	6	16.2	6	Possible	0.74
S9-S11	12.4	--	1	14.0	20	Possible	1.13

Tableau B6 : Indices de fertilité des peuplements de Chêne sessile (calculés dans l'étude) et de Pin laricio (Gilbert et al. 1996) en fonction du type de milieu de la clef de détermination pour les départements du Cher, Loir-et-Cher, Maine-et-Loire, Mayenne et Sarthe.
Les lignes sont classées par rapport croissant de la fertilité Pin sur la fertilité Chêne
Les lignes grisées sont celles retenues pour les simulations

II.1 – 2. Couple Hêtre / Douglas

La méthode pour estimer les fertilités différentielles est sensiblement la même dans le cas du couple Hêtre / Douglas que dans le cas du couple Chêne / Pin. Un modèle d'indice de fertilité du Hêtre (hauteur dominante à 100 ans) en fonction des conditions stationnelles a été développé par Ingrid Seynave (2005a) pour le Massif Central :

$$IF = 39,55 - 0,17 \times pH^2 - 0,47 \times C/N + 0,26 \times Prof - 7,07 \times Alti^2 \quad [B1]$$

où IF est l'indice de fertilité du Hêtre, pH et C/N sont le pH et le C/N estimés à l'aide des valeurs indicatrices des relevés floristiques de l'IFN, $Prof$ est la classe de profondeur de sol de l'IFN (exp : $Prof = 3$ signifie entre 25 et 35 cm de profondeur), et $Alti$ est l'altitude en km.

Ce modèle a été construit en exploitant la base de données de l'IFN et est donc complètement cohérent avec l'utilisation qui en est faite pour cette étude.

De l'autre côté, les indices de fertilité des peuplements de Douglas (hauteur dominante à 50 ans) sont estimés à l'aide des relevés dendrométriques de la base de données de l'IFN, permettant comme dans le cas du Chêne sessile de repositionner les couples (hauteur dominante / âge) dans un faisceau de courbes de croissance en hauteur.

II.1 – 2.1. Données disponibles

Il a été nécessaire d'effectuer une requête auprès de la base de données IFN concernant des douglasaies afin d'obtenir à la fois les données permettant de calculer les indices de fertilité des peuplements, mais aussi les variables permettant d'utiliser le modèle de fertilité du Hêtre.

Pour correspondre aux critères, la requête concerne :

- Zone géographique : les départements de l'Allier (03), de la Corrèze (19), de la Creuse (23), de la Haute-Loire (43), de la Lozère (48) et de la Haute-Vienne (87). Ces départements sont dans une zone plus vaste que le seul Limousin afin de couvrir une plus grande gamme d'altitude, facteur déterminant pour la fertilité du Hêtre
- Essence : Peuplements de Douglas prépondérant

Les résultats de la requête sont de 624 douglasaies.

L'analyse de ces données a permis de recalculer des couples hauteur dominante / âge pour seulement 285 peuplements, en raison en particulier du manque de données concernant les âges.

II.1 – 2.2. Croissance en hauteur dominante

Il est nécessaire d'avoir une courbe de croissance en hauteur dominante pour passer du couple hauteur dominante / âge à l'indice de fertilité (hauteur dominante à 50 ans). Décourt (1973) a construit ce type de courbe pour le Douglas dans le Nord Ouest du massif central en indiquant seulement trois classes de fertilité (28,3 m, 31,2 m et 34,2 m à 50 ans) en raison de la grande homogénéité des stations.

Afin d'estimer la pertinence de l'utilisation de ces courbes par rapport à la ressource considérée, les données IFN et les courbes de Décourt sont placés sur un même graphe (figure B28). La zone de recouvrement est très proche, ce qui confirme la remarque sur la grande homogénéité des fertilités des stations de Douglas. En revanche, le nuage de points des données IFN semble avoir une orientation croisant les courbes de Décourt, ce qui risque de fortement biaiser l'estimation de la fertilité, en particulier pour les peuplements d'âges éloignés de l'âge de référence (50 ans). De plus, dans les études de croissance en hauteur dominante, il est courant d'observer que les peuplements jeunes sont au dessus des courbes de référence, soit en raison des

changements de productivité, soit car les nouveaux peuplements forestiers sont installés sur d'anciennes exploitations agricoles plus fertiles que les sols forestiers. Dans le cas présent, l'effet est inverse, puisque les peuplements jeunes sont en dessous des courbes de Décourt. Il paraît alors nécessaire d'utiliser d'autres courbes de croissance en hauteur dominante.

D'autres faisceaux de courbes existent dans la littérature, en particulier publiés par l'AFOCEL (Bailly et Bigot 1997), mais donnent des résultats nettement moins bons sur le nuage de points des données IFN.

La construction de nouvelles courbes de croissance s'est alors avérée nécessaire afin d'estimer les fertilités de manière plus précise.

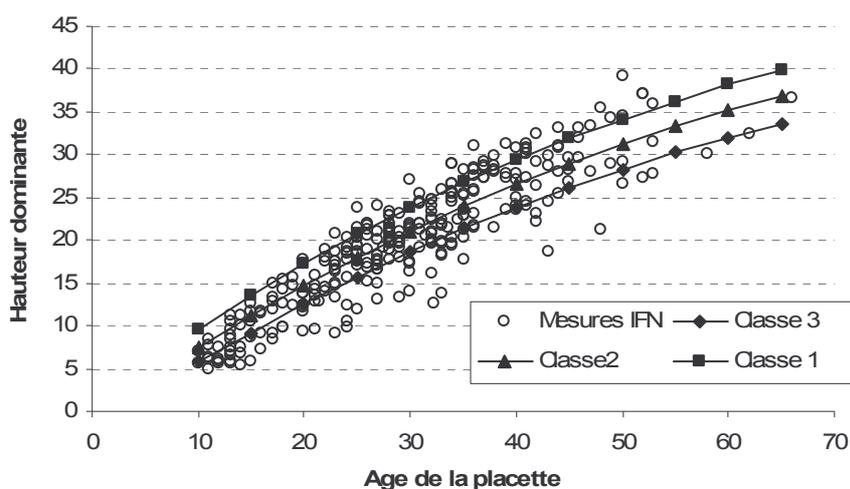
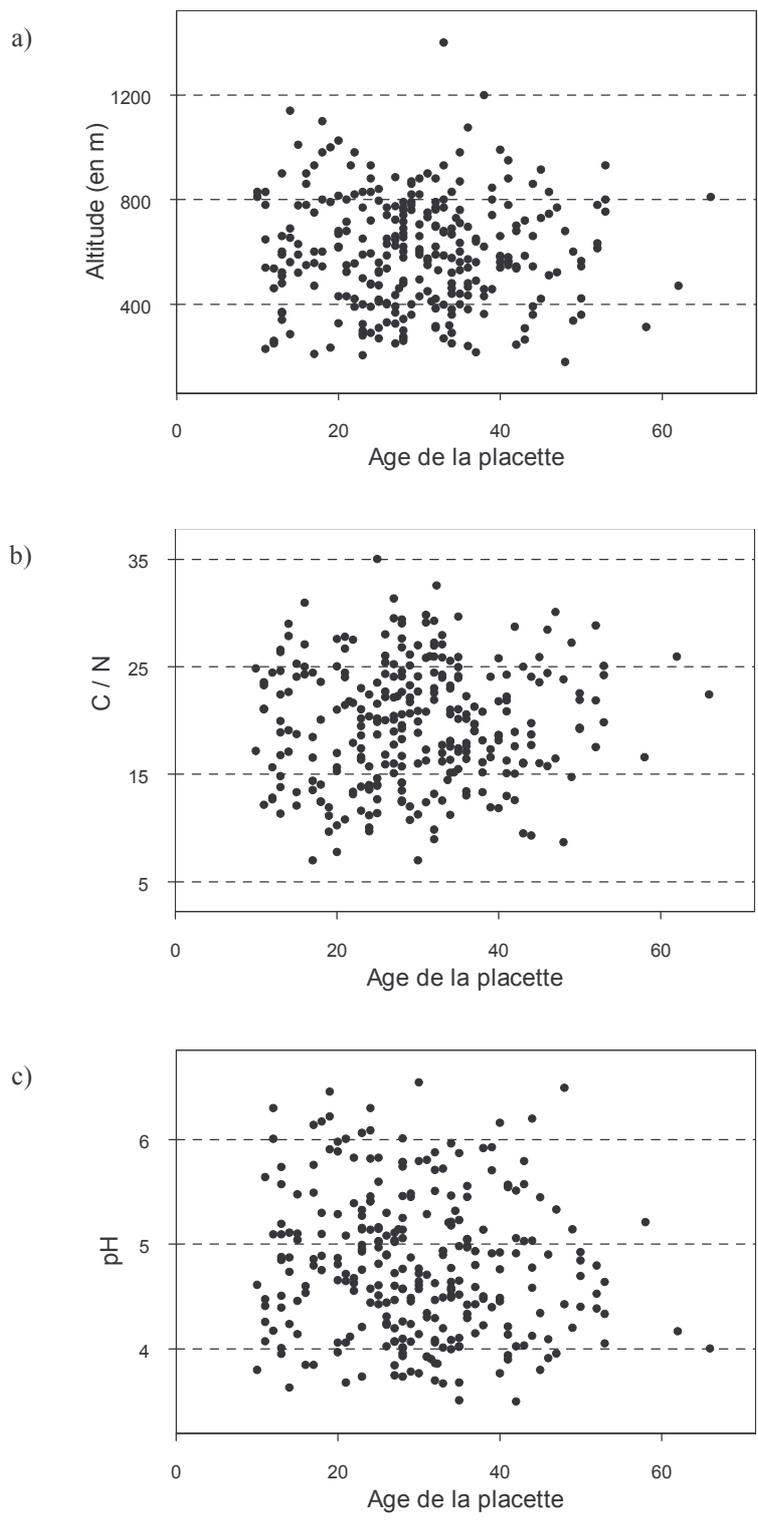


Figure B28 : Superposition des courbes de hauteur dominante de Décourt pour l'Ouest du Massif Central et des données IFN

La démarche la plus correcte pour construire une courbe de croissance en hauteur dominante serait de l'ajuster avec des données longitudinales, qui ne sont actuellement pas disponibles pour le Douglas. Cependant, Décourt a également construit ses courbes avec des observations essentiellement issues de placettes temporaires (Décourt 1965, 1967a), et le problème était alors le même.

Le risque d'élaborer des courbes de croissance sur des données transversales est lié aux fertilités potentiellement différentes entre les classes d'âge, ce qui entraînerait un biais.

Dans le cas des données IFN, plusieurs éléments permettent d'estimer que ce risque est minime. Les figures B29 a), b) et c) montrent l'indépendance des facteurs stationnels altitude, C/N et pH en fonction de l'âge de la placette considérée. Un test statistique a garanti l'indépendance de ces facteurs avec l'âge de la placette. Ces facteurs représentant généralement bien la richesse du milieu, il est raisonnable de construire les courbes de croissance en hauteur sur ces données purement transversales.



Figures B29 : Nuages de point âge de la placette ×
 a) l'altitude, b) le rapport C/N, c) le pH
 pour les départements Allier, Corrèze, Creuse, Haute-Loire, Lozère et Haute-Vienne

Ces précautions étant prises, l'ajustement d'un modèle de type Chapman – Richards a été réalisé sur les données IFN à l'aide du logiciel *S-Plus* (2000) par la méthode des moindres carrés ordinaires. On obtient le modèle suivant :

$$H_0 = \alpha \times [1 - \exp(-\beta \times Age)]^\gamma \quad [B2]$$

où β et γ sont des paramètres de forme, et α est calculé pour assurer la compatibilité avec la fertilité observée (hauteur dominante du peuplement à 50 ans). Les statistiques des ajustements sont données dans le tableau B7.

Paramètre	Valeur	Ecart-Type	Statistique t
α	42,0	3,6	11,5
β	0,0368	0,0069	5,3
γ	1,72	0,22	7,7
<i>DL</i>		σ^2	
282		9,42	

Tableau B7 : Statistiques de l'ajustement du modèle [B2]

La figure B30 présente le nuage de point des âges et hauteurs dominantes, avec la courbe ajustée et les courbes enveloppes en jouant sur la fertilité.

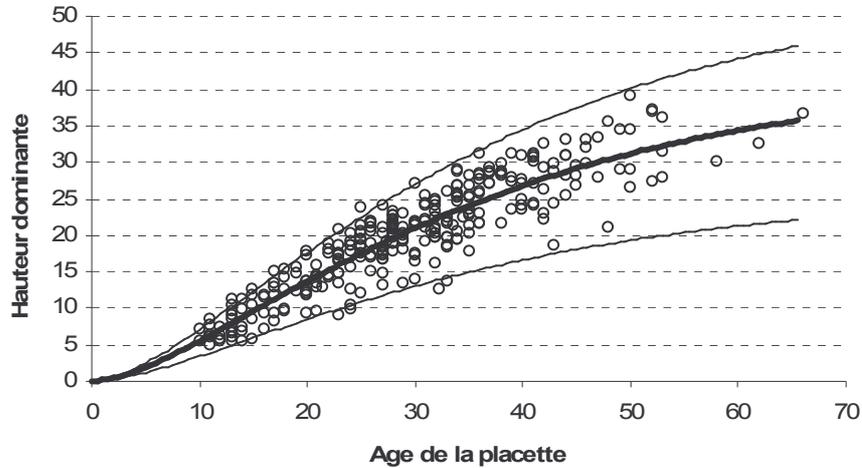


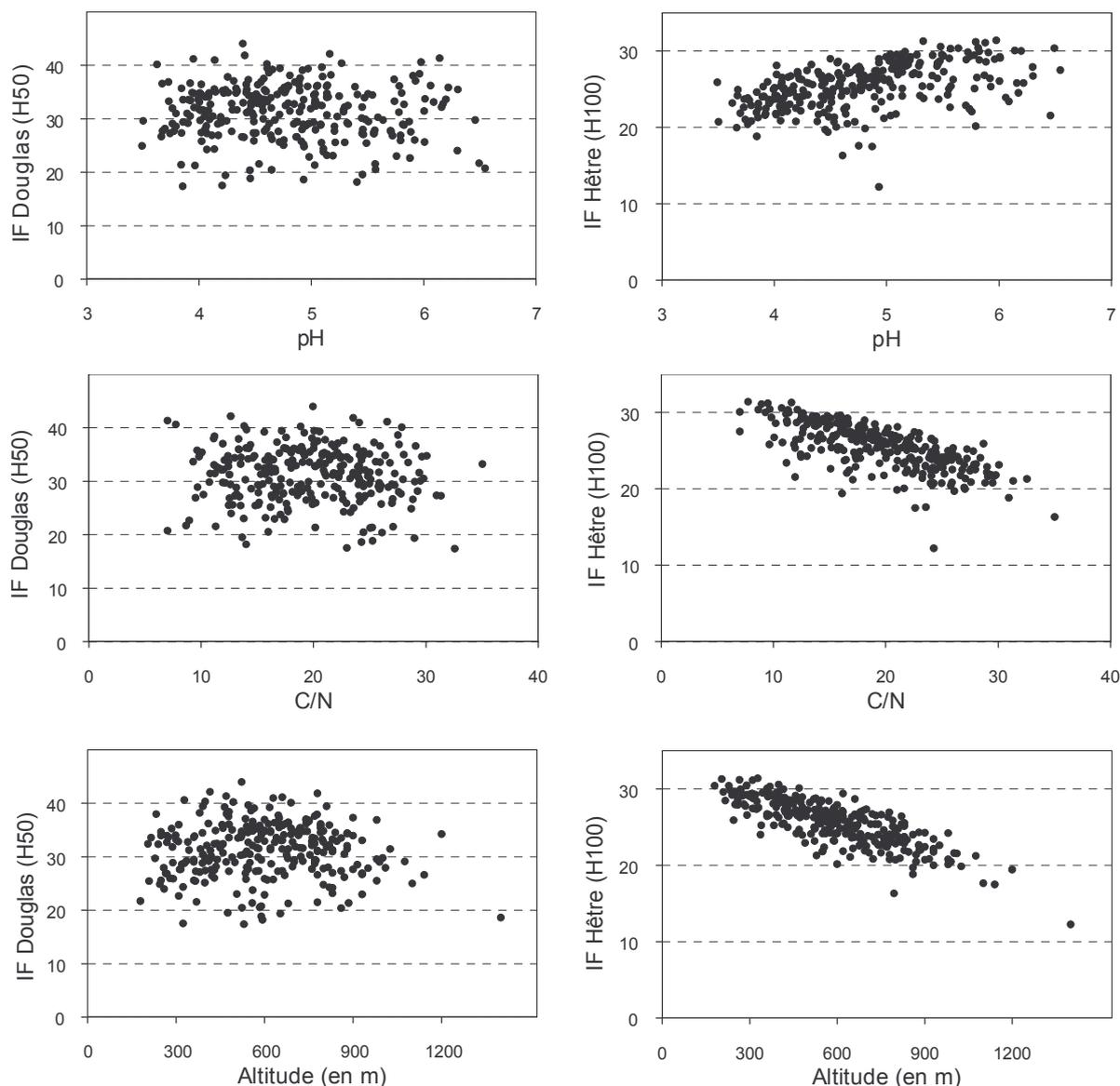
Figure B30 : Courbes de croissance en hauteur dominante pour le Douglas dans le Massif Central.
La ligne épaisse correspond à l'ajustement, les lignes fines correspondent à des fertilités maximales et minimales.

En conclusion, l'utilisation de ces nouvelles courbes est justifiée par plusieurs points : i) l'échantillon est équilibré vis-à-vis des facteurs du milieu, ii) le nouveau faisceau de courbes semble bien concorder avec les enveloppes inférieures et supérieures du nuage de point, iii) les données utilisés pour les tables de Décourt étaient transversales également, iv) l'homogénéité des fertilités des stations, déjà observée par Décourt, limite les risques d'erreur.

II.1 – 2.3. Conséquences sur la fertilité différentielle

La courbe de croissance en hauteur développée permet alors de calculer l'indice de fertilité pour tous les peuplements de Douglas pour lesquels on connaît un couple hauteur dominante / âge.

D'autre part, le modèle de fertilité pour le Hêtre peut être appliqué sur toutes les douglaies pour lesquelles les indices de fertilité sont connus. Les figures B31 présentent les fertilités du Douglas et du Hêtre en fonction du pH, du C/N et de l'altitude, variables d'entrée du modèle d'indice de fertilité du Hêtre de Seynave (2005a).



Figures B31 : Indices de fertilité des peuplements de Douglas (mesurés) et de Hêtre (estimés) en fonction du pH, du C/N, et de l'Altitude pour 285 placettes IFN en peuplement de Douglas pour les départements Allier, Corrèze, Creuse, Haute-Loire, Lozère et Haute-Vienne

Les figures B31 font apparaître une très faible dépendance des conditions stationnelles sur les indices de fertilité dans le cas du Douglas. Il y a peut-être une très légère baisse de la fertilité lorsque l'altitude dépasse 900m, mais les observations ne sont pas suffisamment nombreuses pour le confirmer. Décourt (1976) a observé dans le Limousin une diminution de la fertilité du Douglas pour les altitudes supérieures à 800 m, mais une indépendance avant ce seuil. En revanche, les indices de fertilité du Hêtre (issus du modèle de Seynave), sont très dépendants des conditions stationnelles.

En conséquence, la fertilité choisie pour le Douglas dans les simulations est égale à la moyenne de toutes les observations, c'est-à-dire 31,3 m à 50 ans.

Pour le Hêtre, on choisira alors une situation *a priori* favorable à la substitution d'essence, et une autre *a priori* défavorable. La situation favorable étant pour les fertilités du Hêtre les plus faibles (puisque celle du Douglas est constante), on choisira une station d'altitude (800 m) avec un pH faible (4) et un C/N élevé (27). Dans le cas de la situation défavorable à la substitution, on choisira une altitude faible (300 m), un C/N faible également (10), et un pH élevé (6). Ces trois variables étant fortement corrélées, il faut s'assurer que les triplets (pH, C/N, altitude) choisis existent. La profondeur est prise égale à la moyenne des profondeurs sur toutes les placettes, soit $Prof = 7,4$. La figure B32 montre deux nuages de points extraits des données de la requête IFN décrite plus haut. Les ronds pleins sont l'ensemble des données dont l'altitude est comprise entre 250 et 350 mètres d'altitude, et les ronds vides entre 750 et 850 mètres d'altitude. Les deux triplets choisis sont alors bien admissibles.

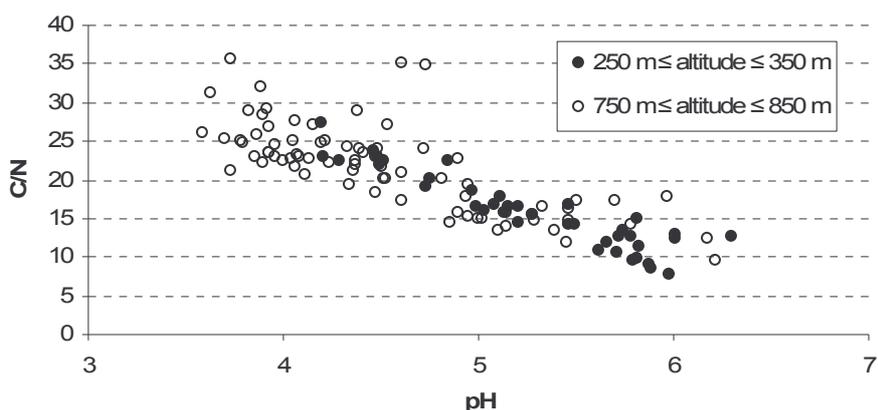


Figure B32 : Nuages de points $pH \times C/N$
pour des altitudes comprises entre 250 et 350 mètres, puis 750 et 850 mètres
soient 119 placettes IFN en peuplement de Douglas
pour les départements Allier, Corrèze, Creuse, Haute-Loire, Lozère et Haute-Vienne

Le modèle de Seynave (2005a) sur la fertilité du Hêtre donne dans ces conditions les indices de fertilité suivants :

- Altitude = 800 m ; pH = 4 ; C/N = 27 : Indice de fertilité = 21,5 mètres à 100 ans
- Altitude = 300 m ; pH = 6 ; C/N = 10 : Indice de fertilité = 30,0 mètres à 100 ans

Par ailleurs, il faut préciser que le modèle de Seynave est calibré sur les données du dernier cycle d'inventaire de l'IFN (placettes de Hêtre), dont la date moyenne est 1995. L'information est importante en raison des changements de productivité observés sur le Hêtre (Badeau *et al.* 1996, Spiecker *et al.* 1996, Dhôte *et al.* 2000a, Bontemps 2002, Bontemps *et al.* 2005b). D'autre part, la fourchette des âges utilisés par Seynave pour qualifier le modèle Hêtre est de 70 à 130 ans, donc centrée autour de l'âge de référence de 100 ans. On considérera alors que les fertilités données pour le Hêtre correspondent à des hauteurs observées en 1995 pour des peuplements de 100 ans.

II.2 – Description des simulations

Ce paragraphe décrit les conditions de simulations utilisées pour mener l'étude de la substitution d'essence. D'abord, les itinéraires sylvicoles pour les quatre essences sont sommairement décrits, ensuite les variables d'entrées pour l'évolution du carbone du sol sont présentées.

II.2 – 1. Evolution des peuplements

La manière de simuler l'évolution des peuplements a été déjà largement décrite dans les chapitres précédents. L'objet de ce paragraphe est de présenter les scénarios choisis pour mener l'étude de la substitution d'essences.

II.2 – 1.1. Pin laricio

Deux fertilités ont été choisies pour les simulations de Pin laricio : 14,6 mètres et 15,7 mètres à 30 ans. Les itinéraires sylvicoles, pour être très réalistes, sont basés sur les recommandations publiées dans le Bulletin Technique de l'ONF (Riou Nivert 1996).

Le premier itinéraire correspond à la production de bois de structure (Charpente). C'est une sylviculture assez peu intensive qui doit mener à un diamètre moyen de 40 cm sur 300 tiges/ha (notons que dans le cas du Pin laricio, l'objectif sylvicole est un diamètre moyen plutôt qu'un diamètre dominant). Les densités initiales sont de 1600 tiges/ha. Cet itinéraire est conduit pour les deux fertilités. On appelle ces simulations « Pin Structure 14,6 » et « Pin Structure 15,7 ».

Le second itinéraire, qui ne peut s'appliquer que pour les meilleures fertilités vise à produire rapidement du bois sans nœuds. L'objectif sylvicole est l'obtention rapide d'un diamètre moyen de 50 cm sur 200 tiges/ha ayant été élaguées. La densité initiale de la plantation est 1100 tiges/ha. Ce scénario est appliqué uniquement à la meilleure fertilité (15,7 mètre à 30 ans). Il est noté « Pin Intensif 15,7 ».

Les simulations ont été menées avec le simulateur *Pnl* implémenté dans l'environnement CAPSIS 2.45 par Céline MEREDIEU. L'évolution du peuplement pour ces trois scénarios est illustrée dans les figures B33 a) et b). Les âges des coupes rases sont proches : 61 ans et 65 ans pour les scénarios « Pin Structure 15,7 » et « Pin Structure 14,6 » et 64 ans pour « Pin Intensif 15,7 ».

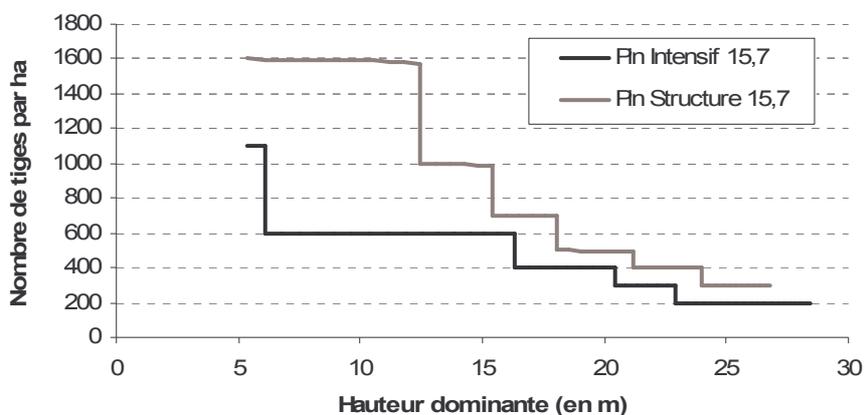


Figure B33 a) : Nombre de tiges/ha en fonction de la hauteur dominante pour les scénarios Pin Intensif 15,7 et Pin Structure 15,7
Le scénario Pin Structure 14,6 n'est pas indiqué car confondu avec Pin Structure 15,7

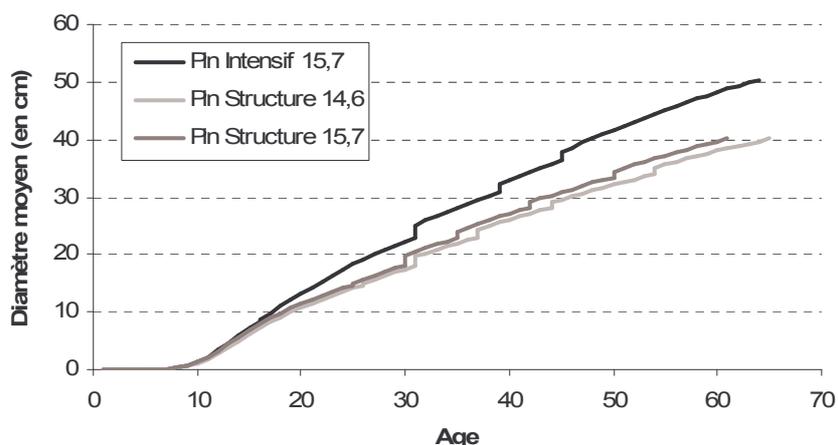


Figure B33 b) : Diamètre moyen du peuplement (en cm) en fonction de l'âge pour les trois scénarios de Pin laricio

II.2 – 1.2. Chêne sessile

L'étude de la substitution d'essence est découplée des stratégies de capitalisation sur pied. L'itinéraire sylvicole pratiqué pour le Chêne sessile sera donc le plus neutre possible à ce niveau. Les indices de densité choisis sont alors proches de ceux du scénario de l'ONF pour une bonne fertilité (Jarret 1996), c'est-à-dire un scénario sans dépressage, puis un RDI objectif de 0,85 descendant progressivement jusqu'à 0,65 en fin de révolution. Le diamètre dominant d'exploitabilité est de 70 cm. Les simulations sont menées avec *Fagacées*.

Les indices de fertilité sont 24,2 et 25,9 mètres à 100 ans pour correspondre à l'étude du chapitre précédent sur la fertilité différentielle. Les scénarios sont notés « Chêne 24,2 » et « Chêne 25,9 » (figure B34).

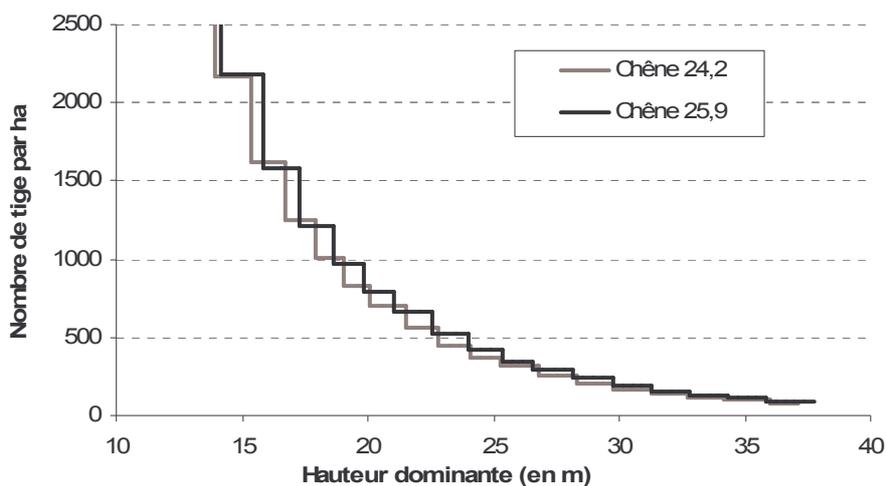


Figure B34 : Nombre de tiges/ha en fonction de la hauteur dominante pour les scénarios Chêne 24,2 et Chêne 25,9

II.2 – 1.3. Douglas

Le Douglas étant très prisé des propriétaires forestiers, il est alors intéressant de simuler à la fois les itinéraires proposés par l'AFOCEL (de Champs 1997) et les itinéraires recommandés par l'ONF (de Champs et Demarcq 1996).

L'AFOCEL comme l'ONF proposent deux types de scénarios : un long et un court. Les scénarios courts privilégient la production de bois moyen en un minimum de temps, alors que les scénarios longs visent à des bois de qualité d'un diamètre supérieur. Au final, puisqu'une seule fertilité est appréhendée dans le cas du Douglas (31,3 mètres à 50 ans), quatre simulations sont menées, appelées « Douglas Afocel court », « Douglas Afocel long », « Douglas Onf court » et « Douglas Onf long ».

Dans le simulateur *Simcop*, le calendrier des éclaircies et de la coupe rase doivent être fixés avant le début des simulations. Il est alors délicat de se fixer un diamètre moyen objectif pour stopper les révolutions. Les scénarios sont alors basés sur les hauteurs dominantes.

Le graphe des nombres de tiges en fonction de la hauteur dominante est donné figure B35. On remarque que les scénarios de l'ONF et de l'AFOCEL, même s'ils sont des mêmes auteurs, sont assez différents.

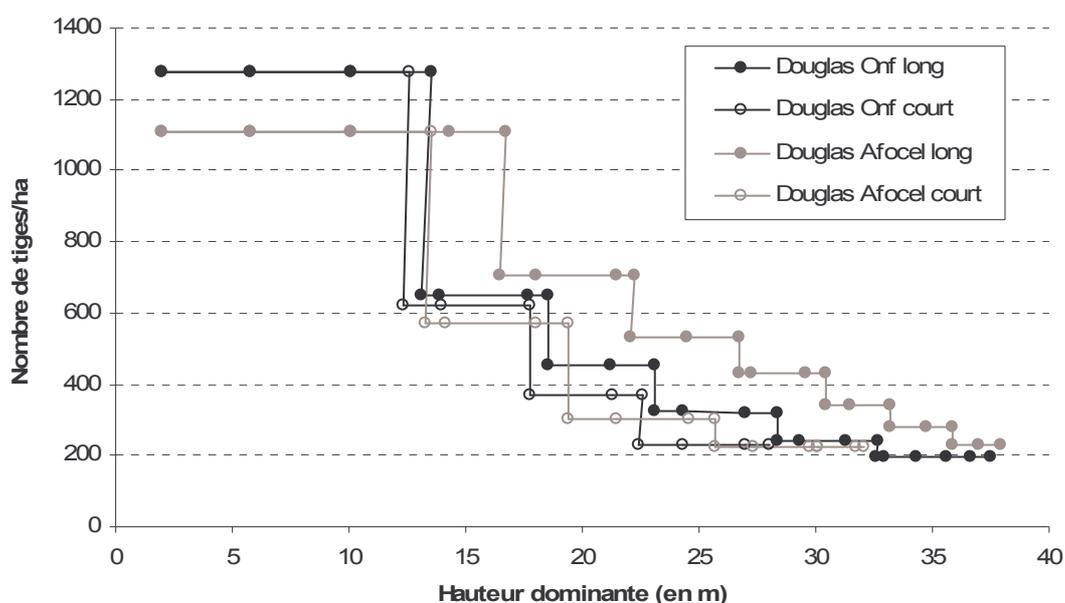


Figure B35 : Nombre de tiges/ha en fonction de la hauteur dominante pour les scénarios « Douglas Onf long », « Douglas Onf court », « Douglas Afocel long » et « Douglas Afocel court »

Les diamètres moyens correspondant à ces itinéraires sont donnés figure B36. Ils augmentent beaucoup plus lentement pour les scénarios longs que pour les scénarios courts en raison des éclaircies moins dynamiques, en particulier pour « Douglas Afocel Long ».

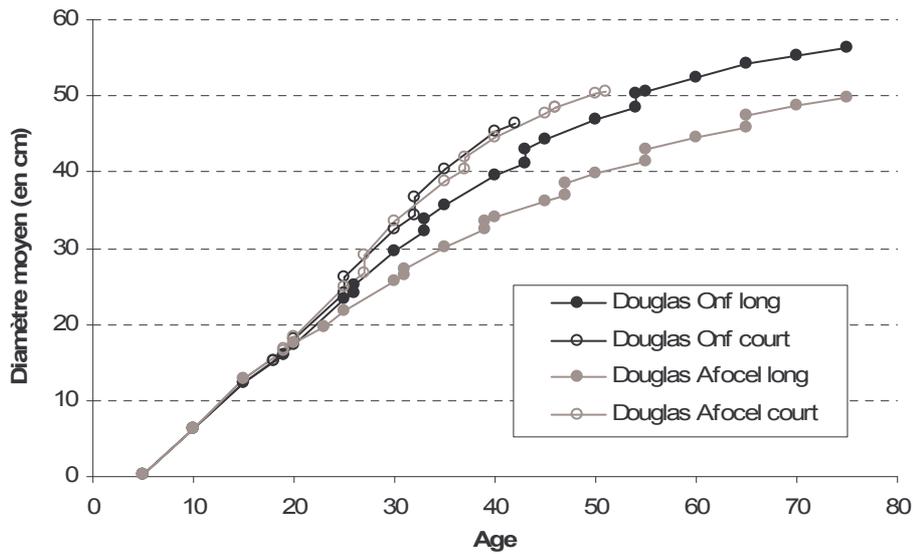


Figure B36 : Diamètre moyen du peuplement (en cm) en fonction de l'âge pour les quatre scénarios de Douglas

II.2 – 1.4. Hêtre

De même que pour le Chêne sessile, le scénario choisi doit être assez standard. Deux fertilités sont considérées : 21,5 mètres et 30,0 mètres de hauteur dominante à 100 ans observée en 1995.

Le scénario choisi est proche de celui des recommandations de l'ONF pour le Hêtre (Duplat et Roman-Amat 1996). C'est un scénario dynamique (figure B37), avec deux dépressages dans le jeune âge. Les RDI finaux sont de 0,4. Un diamètre dominant de 61 cm est atteint en 108 ans pour la bonne fertilité et de 52 cm en 120 ans pour la fertilité faible. Les scénarios sont notés « Hêtre 21,5 » et « Hêtre 30,0 ».

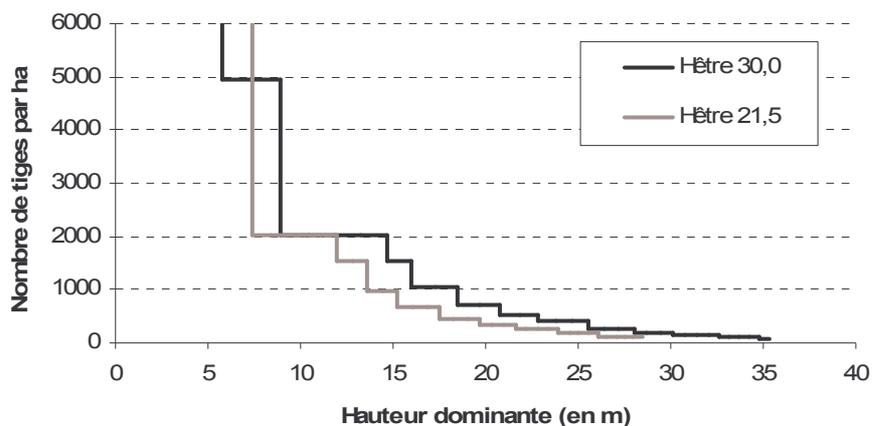


Figure B37 : Nombre de tiges/ha en fonction de la hauteur dominante pour les scénarios Hêtre 21,5 et Hêtre 30,0

II.2 – 2. Carbone du sol

Dans la partie capitalisation sur pied, les différentes sylvicultures ont été considérées sans influence sur le stock de carbone du sol. En revanche, la substitution d'essence modifie les apports au sol, aussi bien quant à leur qualité que leur quantité. Le modèle *Century* permet d'estimer l'évolution des stocks de carbone du sol.

Lorsque la stratégie sylvicole envisagée est la substitution d'une essence par une autre, on peut considérer que l'état initial du sol correspond à l'équilibre de l'essence initiale. On utilisera alors les valeurs d'équilibre du modèle dans les conditions de l'essence initiale comme point de départ des simulations avec l'essence alternative.

Par ailleurs, cette stratégie sylvicole est étudiée sur des régions particulières, et les variables d'entrées doivent être détaillées.

II.2 – 2.1. Quantités d'apports de carbone au sol

Pour les apports de carbone au sol par les feuilles et les racines, les valeurs choisies seront les valeurs moyennes calculées dans le paragraphe A.II.6, reprises dans le tableau B8. Rappelons qu'elles sont calculées pour conduire à des valeurs à l'équilibre (simulation de 10 000 ans) égales aux observations de stocks sur les données des réseaux européen et RENECOFOR.

	<i>Chêne sessile</i>	<i>Pin laricio</i>	<i>Hêtre</i>	<i>Douglas</i>
<i>Valeur des apports annuels totaux (en tC/ha/an)</i>	3,900	3,456	4,312	5,062

Tableau B8 : Apports annuels de carbone foliaire et racinaire suivant les essences

II.2 – 2.2. Conditions climatiques

La région choisie pour la substitution du Chêne sessile par du Pin laricio est Centre – Pays de la Loire. Les moyennes trentennales de température, précipitations et évapo-transpiration sont connues pour tous les points du Réseau Européen grâce au modèle *Aurhely* de Météo-France (Bénichou et le Breton 1987). De plus, ce réseau est systématique.

Les conditions climatiques utilisées pour les simulations avec *Century* seront alors la moyenne des températures de tous les points du Réseau Européen concernant les départements du Cher, du Loir-et-Cher, du Maine-et-Loire, de la Mayenne et de la Sarthe.

La démarche n'est pas tout à fait identique pour la substitution du Douglas par le Hêtre. En effet, dans la mesure où deux conditions d'altitudes sont considérées et où celles-ci sont fortement corrélées avec le climat, les points sont choisis parmi les départements de l'Allier, de la Corrèze, de la Creuse, de la Haute-Loire, de la Lozère et de la Haute-Vienne pour correspondre à la zone géographique (Massif Central), mais aussi dans les deux gammes d'altitude.

Pour la bonne fertilité (300 mètres), les points sont sélectionnés dans la gamme 250 mètres à 350 mètres (29 observations). Pour la fertilité faible du Hêtre (altitude de 800 mètres), la gamme est un peu plus étendue (700 à 900 mètres d'altitude) pour avoir un plus grand nombre de points (6 observations). Le petit nombre d'observations est suffisant dans la mesure où les valeurs sont issues d'un modèle, et basées sur des moyennes trentennales, ce qui limite fortement la variabilité.

Les figures B38 a), b) et c) montrent les conditions climatiques pour les trois situations. La région Centre – Pays de la Loire est moins pluvieuse que le Massif Central, et les stations en altitude sont plus fraîches.

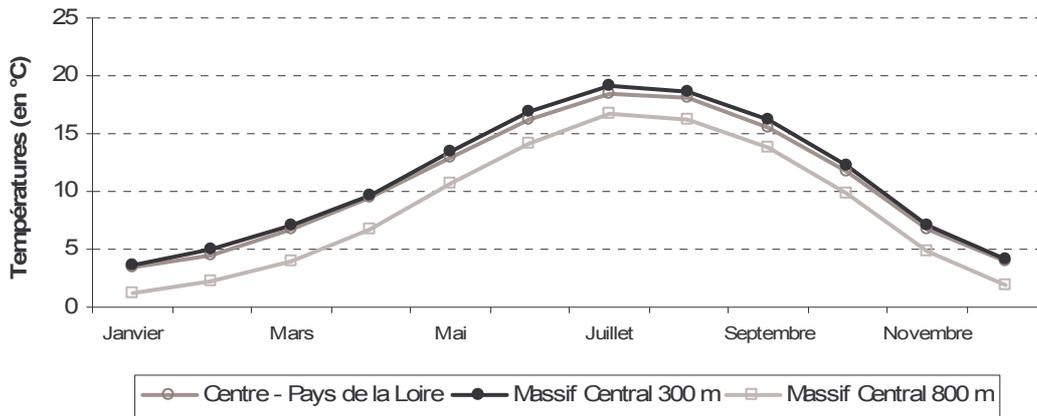


Figure B38 a) : Températures mensuelles pour les trois zones d'étude

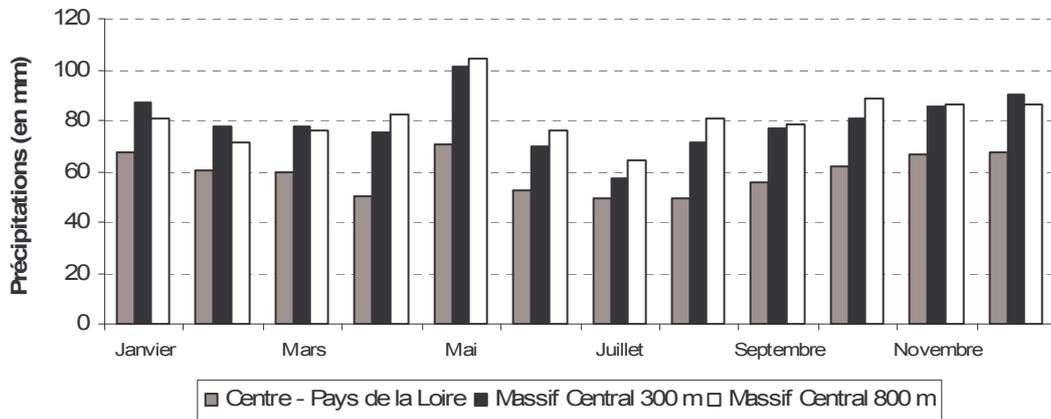


Figure B38 b) : Précipitations mensuelles (en mm) pour les trois zones d'étude

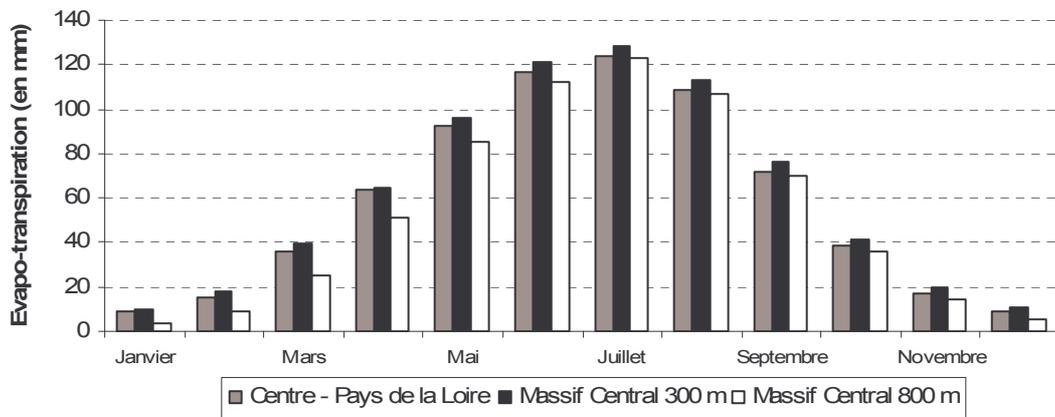


Figure B38 c) : Evapo-transpirations mensuelles (en mm) pour les trois zones d'étude

II.2 – 2.3. Autres conditions

Les valeurs de Lignine / Azote nécessaires en entrée du modèle *Century* sont données dans le paragraphe A.II.6. Les mêmes valeurs sont utilisées ici.

La dernière entrée à fournir en entrée du modèle *Century* est la texture du sol. Si l'essence alternative est plantée en substitution de l'essence initiale, la texture du sol ne sera pas modifiée, au moins à moyen terme. La texture de l'essence initiale est alors utilisée, on prend la valeur moyenne de tous les points correspondant à cette essence et localisés dans les départements de l'aire géographique considérée.

II.3 – Bilans de carbone par essence

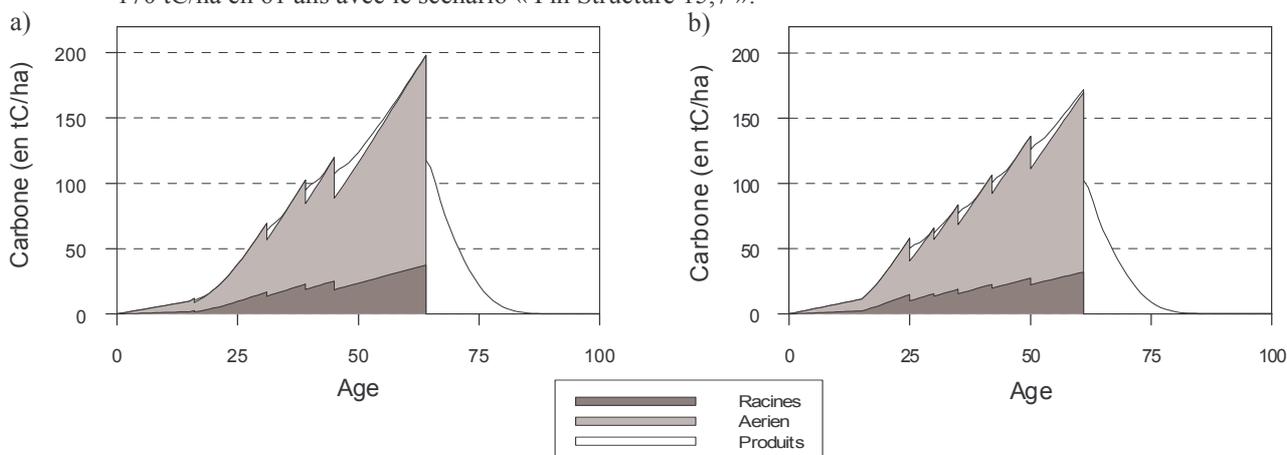
La simulation des scénarios exposés précédemment engendre des stocks de carbone différents qui sont présentés essence par essence dans ce chapitre. Les résultats concernant les feuillus ayant été largement détaillés dans la partie sur la capitalisation sur pied, le bilan des simulations pour la substitution d'essence sera succinct. En revanche, celui des résineux est plus profondément décrit.

D'autre part, on ne s'intéresse dans ce chapitre qu'à la partie peuplement et à la partie des produits forestiers. L'évolution du carbone du sol suite à la substitution d'essences est traitée dans la partie « Impact de la substitution ».

II.3 – 1. *Pin laricio*

Deux scénarios, le premier pour produire des bois de structure et le second plus intensif visant à obtenir rapidement des gros bois sans nœud, sont simulés pour la même fertilité (15,7 mètres de hauteur dominante à 30 ans). Un troisième scénario, pour produire du bois de structure également mais avec un indice de fertilité légèrement plus faible (14,6 mètres à 30 ans) est simulé, mais les résultats, très proches du scénario de structure avec 15,7 mètres à 30 ans, ne seront exposés qu'au paragraphe B.II.4 pour la comparaison avec le Chêne sessile.

Le bilan de carbone (hors évolution du carbone du sol) pour ces deux scénarios (« Pin Intensif 15,7 » et « Pin Structure 15,7 ») est présenté figures B39 a) et b). L'évolution est très rapide puisque le stock de 198 tC/ha est atteint en 64 ans avec le scénario « Pin Intensif 15,7 », et 170 tC/ha en 61 ans avec le scénario « Pin Structure 15,7 ».



Figures B39 : Stocks de carbone cumulés en fonction de l'âge du peuplement pour les scénarios a) « Pin Intensif 15,7 » et b) « Pin Structure 15,7 »

D'autre part, les révolutions sont beaucoup plus courtes pour le Pin laricio qu'elles ne l'étaient pour les feuillus. Les produits forestiers ont alors une proportion plus importante avec une moyenne sur la révolution de 14,6 tC/ha (figure B40). Le carbone du sol ne figure pas dans cette analyse ; les pourcentages ne sont alors pas indiqués pour éviter les confusions avec les graphes sur les feuillus du chapitre « Capitalisation sur pied ».

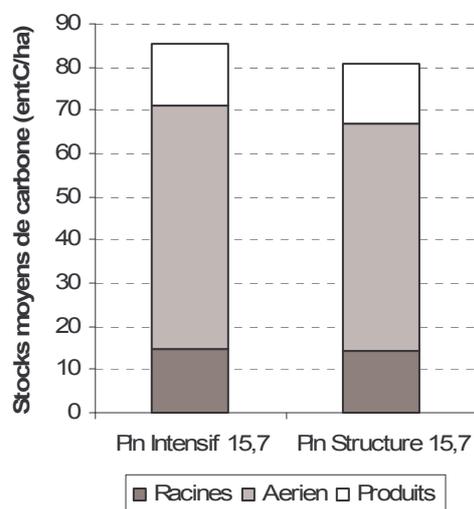


Figure B40 : Valeurs des stocks moyens sur l'ensemble de la révolution pour les simulations de Pin laricio « Pin Intensif 15,7 » et « Pin Structure 15,7 »

La proportion de produits forestiers est faible par rapport à celle de la biomasse aérienne en particulier. Pourtant, elle correspond bien aux résultats de la littérature : Liski *et al.* (2001), dans une étude sur la longueur de révolution la plus favorable au stockage de carbone dans des peuplements de Pin sylvestre en Finlande obtiennent des stocks moyens de carbone dans la biomasse de 38 tC/ha et dans les produits forestiers de 7,4 tC/ha pour une sylviculture moyenne. Les valeurs inférieures des stocks moyens sont dues à la productivité bien moindre du Pin sylvestre que le Pin laricio, ainsi qu'au climat plus favorable en France. Les produits forestiers représentent alors dans les simulations de Liski *et al.* 19,5 % du stock de la biomasse, et les pourcentages correspondants dans nos simulations sont de 20,6 % pour le scénario « Pin Intensif 15,7 » et 20,1 % pour le scénario « Pin Structure 15,7 ». Les proportions sont donc extrêmement proches.

Les valeurs de stock de carbone dans la biomasse sont très élevées. Ils sont dus à une productivité élevée, mais aussi à une densité assez forte par rapport aux autres résineux : la figure B41, extraite de l'étude de Leban *et al.* (2001) montre un décalage fort du barycentre de la masse volumique du Pin laricio vers les valeurs élevées par rapport à celui de l'Epicéa.

Lorsque l'on divise la biomasse aérienne de l'ensemble des arbres par le volume correspondant, on obtient une valeur moyenne de l'infradensité du peuplement. L'âge des arbres ayant un effet positif fort sur la infradensité du Pin laricio (Leban *et al.* 2001), cette infradensité moyenne est bien plus élevée (0,547 tMS/m³) en fin de révolution qu'à 15 ans (0,404 tMS/m³) (figure B42). La forme de cette courbe ainsi que les valeurs obtenues sont cohérentes avec l'étude de Leban (2001) En conséquence, les infradensités élevées induisent des biomasses fortes.

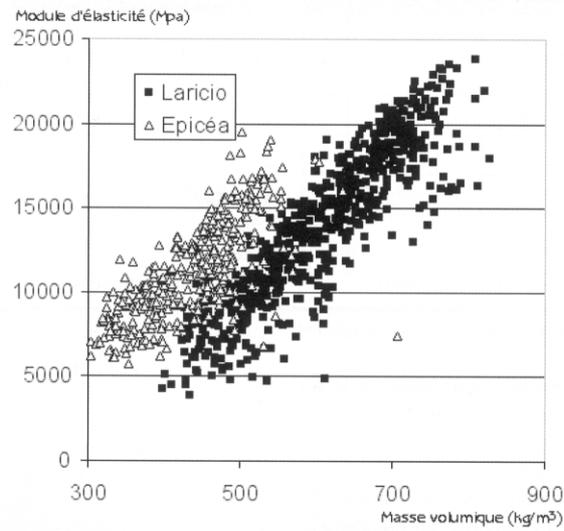


Figure B41 : Module d'élasticité en fonction de la masse volumique pour l'Epicéa et le Pin laricio. Extrait de Leban et al. (2001)

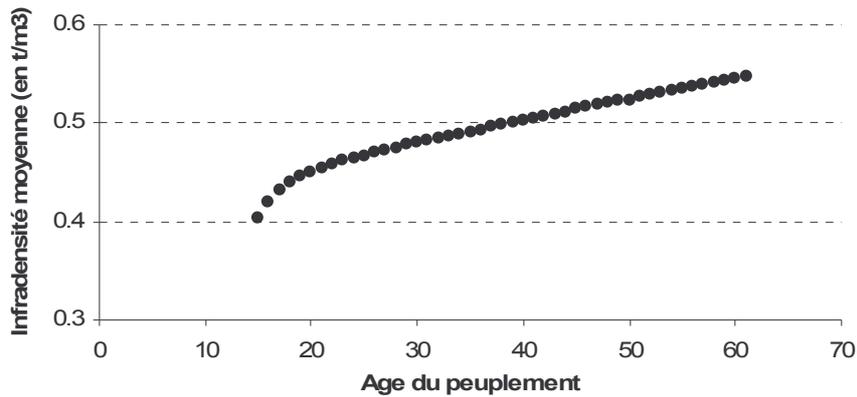


Figure B42 : Infradensité moyenne du peuplement (en tMS/m³) en fonction de l'âge pour le scénario «Pin Structure 15,7 »

Les produits forestiers issus de l'exploitation du Pin laricio sont multiples. Ils peuvent approvisionner toutes les filières : bois énergie, papier-carton, emballage, construction et ameublement. La répartition dans ces filières est intéressante à comparer pour les scénarios « Pin Intensif 15,7 » et « Pin Structure 15,7 » puisque dans les deux cas, la fertilité du peuplement est la même (figure B43). On observe tout d'abord que les exportations annuelles moyennes sont sensiblement les mêmes entre les deux scénarios, aux alentours de 9,5 m³/ha/an. La répartition n'est par contre pas identique : la part des volumes partant en bois énergie ou en pâte à papier est plus importante dans le cas du scénario « Pin Structure 15,7 » (42,5% contre 31,1%). D'autre part, le scénario intensif produit beaucoup de bois pour l'ameublement (42,3%) et peu pour la construction (13,7%), alors que cette tendance est moins forte pour le scénario de structure (30,2% en ameublement contre 19,7% en construction). Les itinéraires sylvicoles visent à ce résultat.

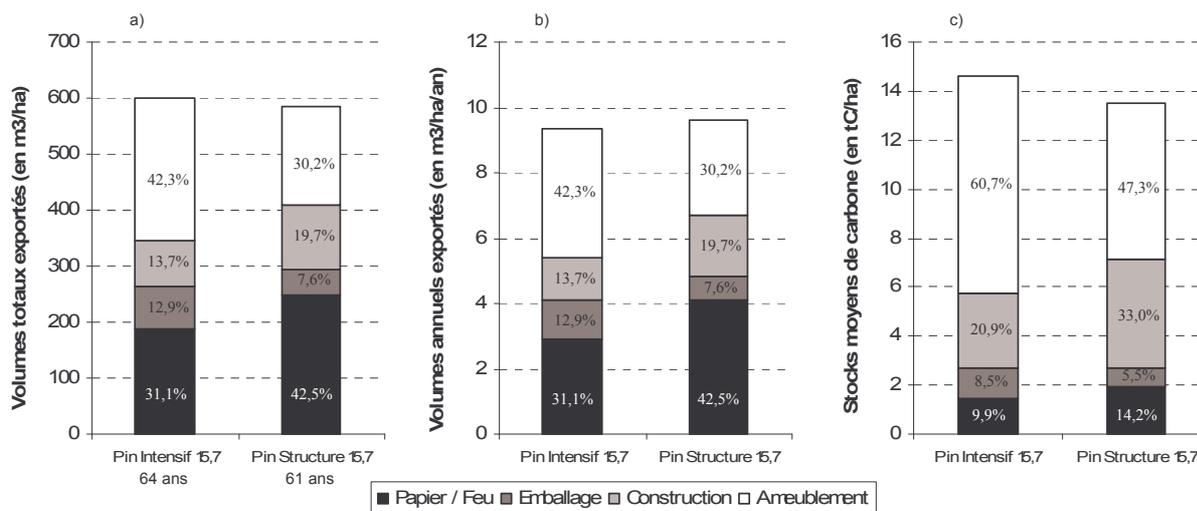


Figure B43 : Produits issus des sylvicultures « Pin Intensif 15,7 » et « Pin Structure 15,7 »
a) Volume total exporté sur l'ensemble de la révolution (en m³/ha)
b) Volumes annuels exportés (en m³/ha/an)
c) Contribution au stock de carbone moyen (en tC/ha)
Les révolutions sont de 64 ans pour le scénario Intensif, 61 ans pour le scénario Structure

La production d'une grande quantité de bois pour l'ameublement est essentiellement expliquée par la pratique d'élagages jusqu'à 6 mètres dans le scénario « Pin Intensif 15,7 ». Le peuplement conduit avec le scénario « Pin Structure 15,7 » n'en ayant pas subi, les planches présentent plus de nœuds, qui ne sont pas réhabilitables pour le classement en bois de construction lorsqu'ils ne sont pas trop gros (CTBA 1994). Ce constat explique également la plus forte part de bois énergie et pâte à papier.

Un troisième scénario, appelé « Pin Structure 14,6 », est quasiment identique au scénario « Pin Structure 15,7 » mais pousse en 65 ans en raison de sa fertilité légèrement plus faible.

II.3 – 2. Chêne sessile

Les fertilités des deux scénarios de Chêne sessile sont assez proches. Il y a assez peu de différence entre les deux courbes d'évolution de stocks de carbone (figure B44). Celui-ci augmente jusqu'à près de 200 tC/ha en fin de révolution.

Les stocks moyens sont de 20,8 tC/ha pour le système racinaire pour les deux scénarios, de 95,8 tC/ha (resp. 98,4 tC/ha) pour la biomasse aérienne, et de 10,8 tC/ha (resp. 10,9 tC/ha) pour les produits forestiers pour le scénario « Chêne 24,2 » (resp. « Chêne 25,9 »). Les stocks moyens totaux sont alors de 127,4 tC/ha pour « Chêne 24,2 » et 130,1 tC/ha pour « Chêne 25,9 » (hors matière organique du sol).

La répartition des produits forestiers a déjà été décrite pour le Chêne sessile dans le chapitre « Capitalisation sur pied » et n'est pas reprise ici.

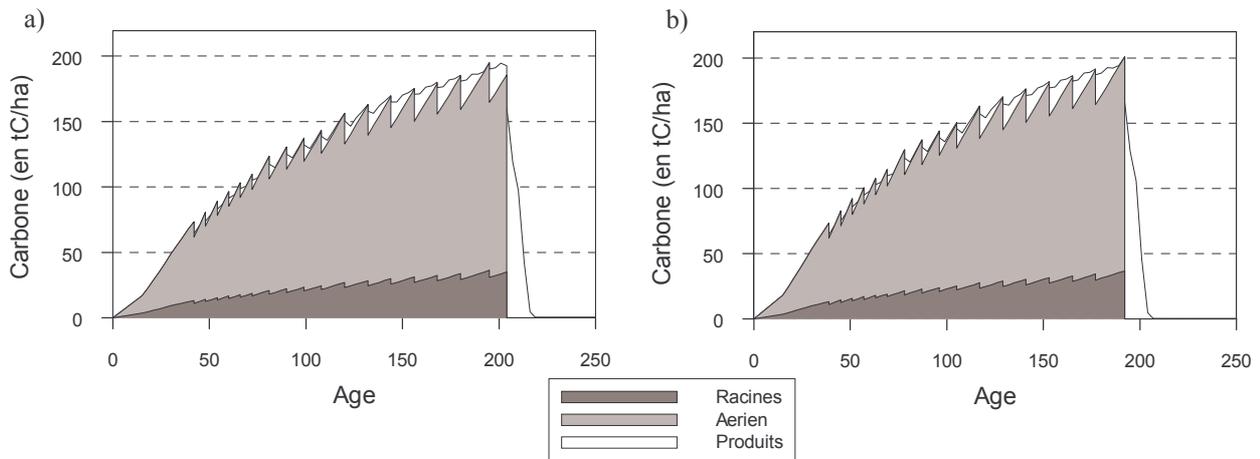


Figure B44 : Stockage de carbone dans la biomasse du peuplement et dans les produits forestiers pour les scénarios a) « Chêne 24,2 » et b) « Chêne 25,9 »

Notons que la productivité de ces peuplements est de $8 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ de bois fort pour le scénario « Chêne 25,9 » et de $7,5 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ pour le scénario « Chêne 24,2 ». Ces productivités ne sont que légèrement inférieures à celles du Pin laricio présentées avant ($9,5 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$), alors que les valeurs de $200 \text{ tC}/\text{ha}$ sont atteintes en plus de trois fois plus de temps.

Cela s'explique par les grandes quantités de bois sorties lors des éclaircies dans les scénarios de Chêne par rapport à ceux de Pin. Par exemple, dans le scénario « Chêne 25.9 », $985 \text{ m}^3/\text{ha}$ de bois (en volume total) ont été sortis de la forêt lors des éclaircies, alors qu'il reste $701 \text{ m}^3/\text{ha}$ lors de la coupe finale. Dans le cas du scénario « Pin Intensif 15,7 », seulement $210 \text{ m}^3/\text{ha}$ sont exportés lors des différentes éclaircies, alors qu'il reste $590 \text{ m}^3/\text{ha}$ de bois sur pied au moment de la coupe finale. Les volumes bien moindres exportés lors des éclaircies expliquent qu'à productivité seulement légèrement supérieure, les peuplements de Pin laricio atteignent les mêmes stocks sur pied que ceux du Chêne en beaucoup moins de temps.

II.3 – 3. Douglas

Le bilan de carbone des parties aériennes, racinaires et produits forestiers des quatre peuplements de Douglas, pour lesquels les indices de fertilité sont identiques, est illustré figure B45. La vitesse de stockage initiale est assez proche pour tous les scénarios excepté « Douglas Afocel Long », puisqu'on observe dans les trois autres cas un stock de carbone de près de $114 \text{ tC}/\text{ha}$ à 40 ans. Le scénario « Douglas Afocel Long » stocke plus rapidement en début de révolution ($129 \text{ tC}/\text{ha}$ à 40 ans) en raison d'une sylviculture moins dynamique initialement. Par rapport aux autres scénarios, celui-ci correspond à un peuplement de densité supérieure.

La forme des courbes du carbone total cumulé pour les quatre scénarios fait apparaître un plateau à environ $174 \text{ tC}/\text{ha}$ atteint pour les scénarios long et non atteint pour les scénarios courts. Il s'ensuit que les scénarios longs ont des stocks moyens plus élevés que les scénarios courts : $63,0 \text{ tC}/\text{ha}$ pour « Douglas Onf Court », $78,5 \text{ tC}/\text{ha}$ pour « Douglas Afocel Court », $108,6 \text{ tC}/\text{ha}$ pour « Douglas Onf long » et $113,0 \text{ tC}/\text{ha}$ pour « Douglas Afocel Long » (figure B46). Notons également que cette différence se fait uniquement sur les biomasses aériennes et racinaires puisque les stocks des produits forestiers sont quasiment égaux dans les quatre cas ($\sim 17 \text{ tC}/\text{ha}$).

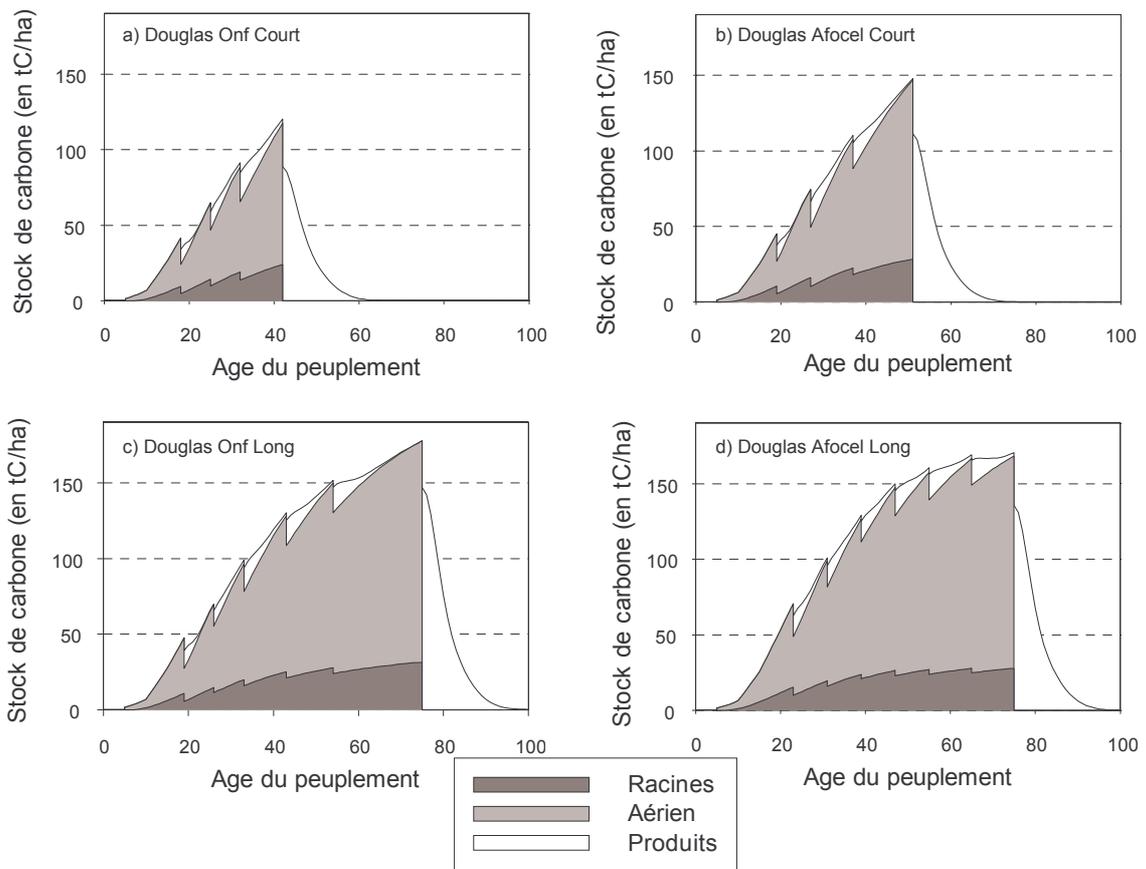


Figure B45 : Stockage de carbone dans la biomasse du peuplement et dans les produits forestiers pour les scénarios a) « Douglas Onf Court » et b) « Douglas Afocel Court » c) « Douglas Onf Long » et d) « Douglas Afocel Long »

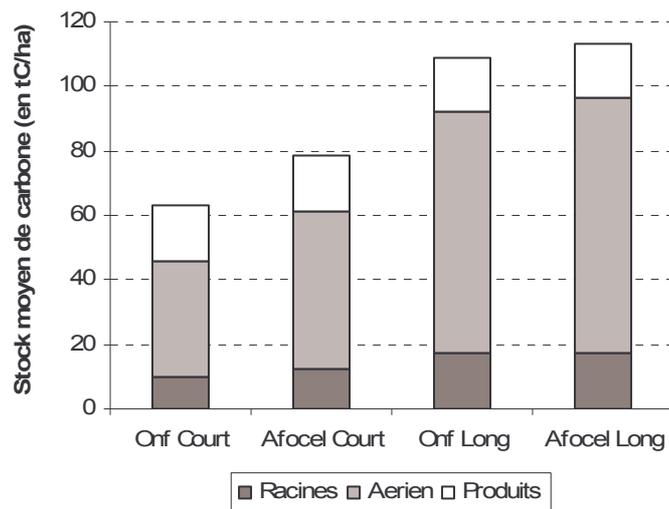


Figure B46 : Valeurs des stocks moyens de carbone sur l'ensemble de la révolution pour les quatre scénarios de Douglas

Le simulateur *Simcop* a permis de fournir directement les biomasses. Pour donner les productions en volume comme cela est fait pour les autres essences, ces biomasses sont divisées par une infradensité moyenne de 0,4 tMS/m³. Nous avons vu dans le paragraphe A.I que cette valeur moyenne est très acceptable.

Les volumes annuels moyens exportés lors des éclaircies et de la coupe finale sont légèrement supérieurs dans le cas des scénarios courts que les scénarios longs avec 15,7 m³/ha/an contre 14,8 m³/ha/an (Figure B47 page suivante), car les peuplements sont plus productifs dans le jeune âge. Ces très fortes valeurs (en volume commercial) reflètent l'excellente productivité de cette essence (de Champs 1997).

Les peuplements de Douglas produisent beaucoup de bois pour la filière emballage par rapport aux autres essences qui produisaient plus de bois énergie ou de pâte à papier. Le stockage de carbone dans les produits est alors favorisé puisque la durée de vie apparente de cette filière est de 3,9 ans contre 2 ans pour les filières bois énergie / pâte à papier.

D'autre part, la répartition des produits n'est guère différente entre les scénarios courts et les scénarios longs. Les premiers produisent proportionnellement plus de gros bois, ce qui profite à la filière ameublement, alors que les seconds ont des stocks de bois emballage un peu supérieurs.

II.3 – 4. Hêtre

Deux fertilités sont envisagées pour le Hêtre, la substitution par le Douglas étant *a priori* plus favorable au stockage de carbone dans le cas la station la moins productive.

Le détail de la répartition des produits forestiers ayant déjà été établi pour le Hêtre dans le cas de la stratégie de capitalisation sur pied, seuls les résultats globaux sont présentés ici (figure B48). Le peuplement le moins productif (indice de fertilité de 21,5 mètres de hauteur dominante à 100 ans observés en 1995) atteint un stock de carbone de 133 tC/ha au bout de 120 ans, alors que le peuplement productif atteint 152 tC/ha en 108 ans.

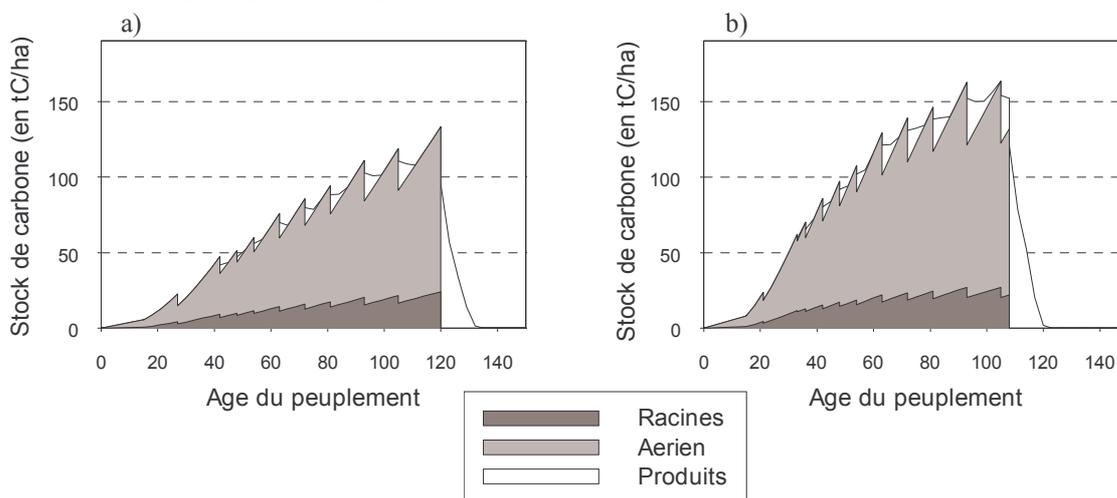


Figure B48 : Stockage de carbone dans la biomasse du peuplement et dans les produits forestiers pour les scénarios a) « Hêtre 21,5 » et b) « Hêtre 30,0 »

Les stocks de carbone moyen hors matière organique du sol sont de 65,4 tC/ha pour le peuplement très peu fertile et de 96,4 tC/ha pour le peuplement fertile. Ces valeurs assez faibles sont dues au scénario très dynamique choisi (itinéraire de Duplat et Roman-Amat (1996)), ainsi que, pour la mauvaise fertilité, au diamètre d'exploitabilité de 52 cm.

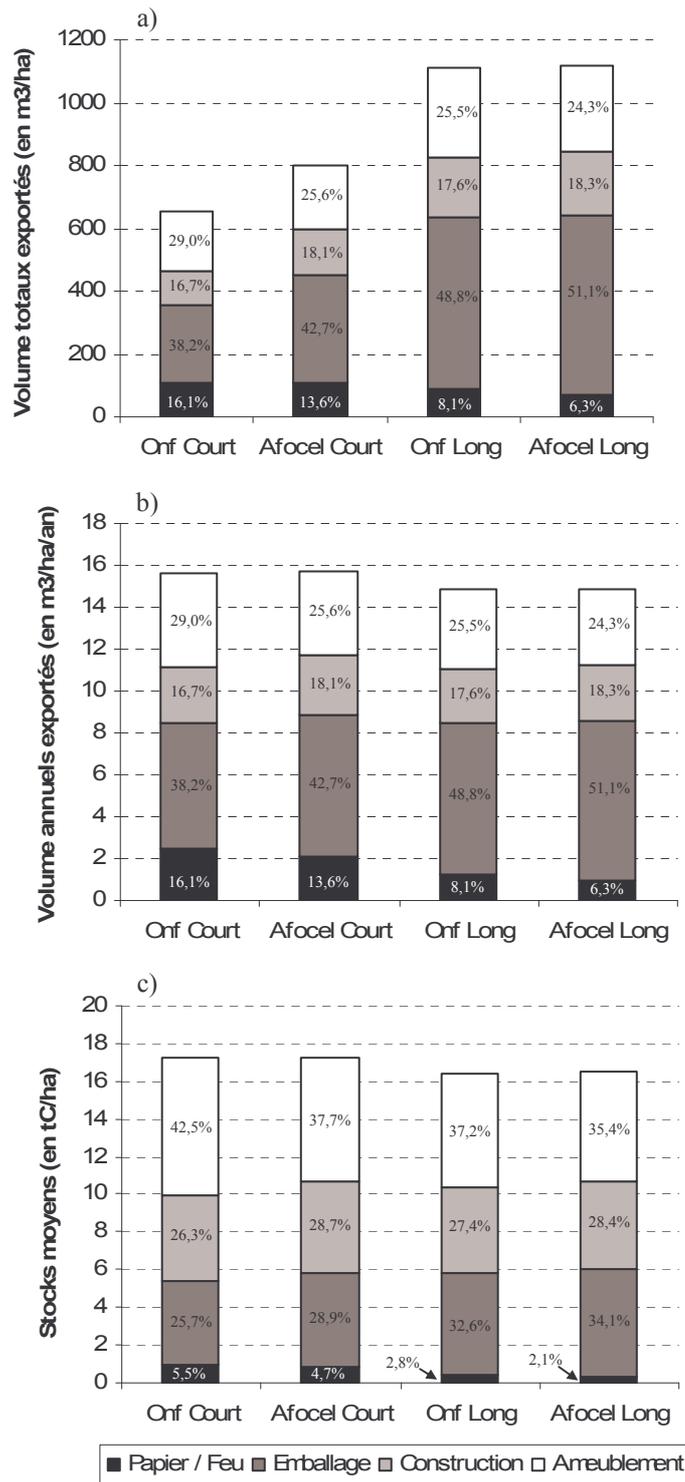


Figure B47 : Produits issus des sylvicultures de Douglas
 a) Volume total exporté sur l'ensemble de la révolution (en m³/ha)
 b) Volumes annuels exportés (en m³/ha/an)

c) Contribution au stock de carbone moyen (en tC/ha)
 Les révolutions sont de 42 ans pour le scénario « Onf Court », 51 ans pour « Afocel Court »
 75 ans pour les scénarios « Onf Long » et « Afocel Long »

II.4 – Impact de la substitution

II.4 – 1. Evolution du carbone du sol

II.4 – 1.1. Couple Chêne sessile / Pin laricio

Avec les conditions climatiques de la région Centre – Pays de la Loire, le stock de carbone du sol à l'équilibre d'un peuplement de Chêne sessile est estimé au moyen du modèle *Century* à 93,0 tC/ha. Le résultat est proche des valeurs moyennes sur l'ensemble du territoire.

Lorsque le Pin laricio est substitué au Chêne sessile, les variations de carbone simulées sont très faibles (Figure B49). Dans un premier temps, on observe une augmentation du stock, puis une diminution jusqu'à une valeur d'équilibre de 92,7 tC/ha.

Lorsque les essences sont substituées, seuls sont modifiés les quantités de carbone apportées et le rapport Lignine / Azote. Le Chêne apporte plus de carbone au sol, mais le rapport Lignine / Azote du Pin est beaucoup plus élevé, ce qui implique une décomposition moindre. Il y a compensation entre les deux facteurs. Celle-ci se fait en partie en modifiant les proportions des compartiments « Actif », « Lent » et « Passif » du modèle *Century* (cf. §A.II) ce qui génère cette augmentation initiale du stock. Cette différence est parfaitement négligeable au vu de la variabilité observée sur le carbone du sol.

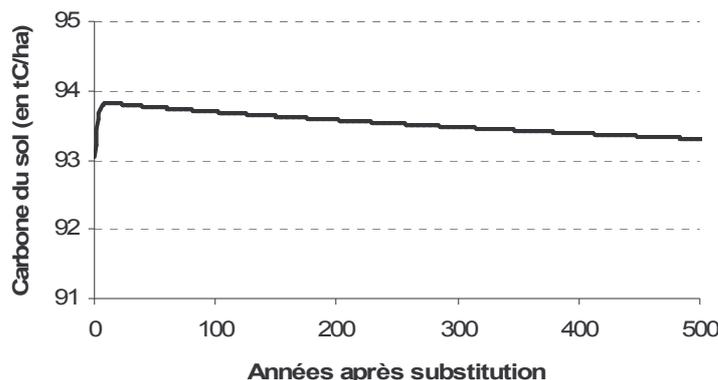


Figure B49 : Evolution du carbone du sol (en tC/ha) en fonction du nombre d'années après la substitution du Chêne sessile par le Pin laricio en région Centre – Pays de la Loire

II.4 – 1.2. Couple Hêtre / Douglas

Le constat n'est pas le même pour la substitution du Hêtre par le Douglas dans le Massif Central. En effet, on observe une augmentation du carbone du sol lorsque le Douglas remplace le Hêtre.

Les valeurs initiales de stock de carbone pour le Hêtre sont de 101,4 tC/ha et 132,8 tC/ha pour les stations d'altitude 300 et 800 mètres. Lorsque la substitution est effectuée, la plantation de Douglas stocke progressivement du carbone dans le sol (figure B50) jusqu'à atteindre les valeurs en régime permanent de 116,7 tC/ha et 152,9 tC/ha pour les stations à 300 et à 800 mètres d'altitude en raison à la fois d'apports de carbone élevés, et d'un L/N favorable.

Notons que dans ces conditions, le climat est responsable à lui seul de 30 % des variations de carbone du sol entre les différents sites.

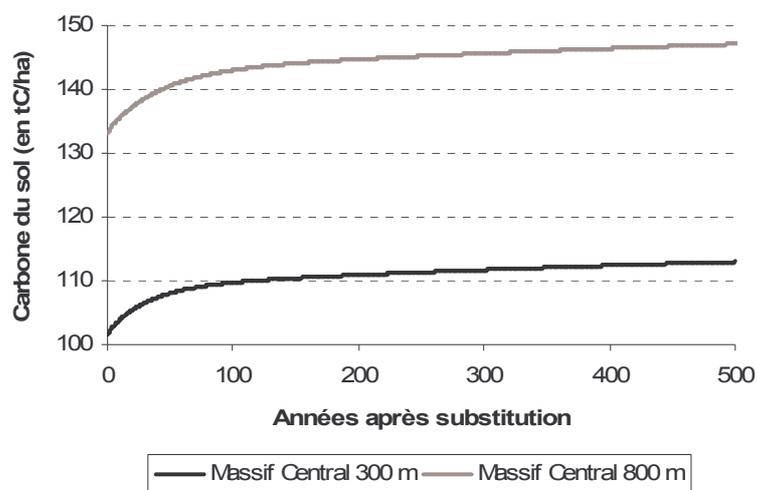


Figure B50 : Evolution du carbone du sol (en tC/ha) en fonction du nombre d'années après la substitution du Hêtre par le Douglas dans le Massif Central pour des altitudes de 300 et de 800 mètres

II.4 – 2. Etude du régime permanent

Le régime permanent est atteint lorsque les mêmes choix sylvicoles sont pratiqués indéfiniment. Pour la partie aérienne du peuplement, ainsi que le stock des systèmes racinaires et les produits forestiers, le stock moyen sur la révolution et le stock moyen en régime permanent sont confondus. En revanche, la cinétique du carbone du sol est beaucoup plus lente, et il faut alors simuler le sol dans les nouvelles conditions un grand nombre d'années avant d'obtenir la valeur en régime permanent.

Le tableau B9 présente les valeurs moyennes de stock total de carbone pour toutes les situations envisagées.

Dans la région Centre – Pays de la Loire dans laquelle la substitution de peuplements Chêne sessile par des plantations de Pin laricio est envisagée, on observe que dans tous les cas, aussi bien ceux *a priori* favorables que défavorable au vu des fertilités, la substitution n'est pas souhaitable pour des stratégies de stockage de carbone à long terme.

En effet, d'après les simulations avec *Century*, le stock de carbone du sol évoluerait très peu, alors la biomasse aérienne et racinaire est bien plus favorable aux peuplements de Chêne sessile que de Pin laricio. Il s'ensuivrait alors un destockage moyen de 42,2 tC/ha lorsque le peuplement de Chêne est le moins productif, et de 48,9 tC/ha pour une meilleure fertilité.

Bien que le Pin laricio soit plus productif que le Chêne sessile, la longévité du second entraîne un temps à l'état mature bien plus long, ce qui est plus favorable au stockage de carbone.

Région	Scénario initial	Scénario alternatif	Différentiel de stock moyen
Centre - Pays de la Loire	Chêne 24,2	Pin Intensif 15,7 Pin Structure 15,7	- 42,2 tC/ha - 47,2 tC/ha
	Chêne 25,9	Pin Structure 14,6	- 48,9 tC/ha
Massif Central	Hêtre 21,5 (800 m d'altitude)	Douglas Onf Court Douglas Afocel Court Douglas Onf Long Douglas Afocel Long	+ 17,7 tC/ha + 33,2 tC/ha + 63,3 tC/ha + 67,7 tC/ha
		Douglas Onf Court	- 17,7 tC/ha
		Douglas Afocel Court	- 02,2 tC/ha
		Douglas Onf Long	+ 27,9 tC/ha
		Douglas Afocel Long	+ 32,3 tC/ha
	Hêtre 30,0 (300 m d'altitude)	Douglas Onf Court Douglas Afocel Court Douglas Onf Long Douglas Afocel Long	- 17,7 tC/ha - 02,2 tC/ha + 27,9 tC/ha + 32,3 tC/ha

Tableau B9 : Stocks de carbone (en tC/ha) en régime permanent après la substitution d'essence
Pour les zones géographiques Centre - Pays de la Loire (départements Cher, Loir-et-Cher, Maine-et-Loire, Mayenne et Sarthe)
et du Massif Central (département Allier, Corrèze, Haute-Loire, Lozère et Haute-Vienne)

Pour le couple de substitution Hêtre / Douglas dans le Massif Central, le constat est plus mitigé.

En station d'altitude, moins propice au Hêtre (indice de fertilité de 21,5 mètres à 100 ans observé en 1995), le carbone du sol donnerait un stockage additionnel de 20 tC/ha en cas de substitution par le Douglas. Rappelons que ces valeurs sont très dépendantes des apports de matière au sol, et que ceux-ci ont été estimés indirectement avec les moyennes par essence des réseaux européen et RENECOFOR.

Ensuite, suivant la sylviculture, les plantations de Douglas peuvent ajouter une contribution à ce stockage additionnel par la biomasse et les produits forestiers. Si les scénarios courts sont neutres ou légèrement favorables en terme de stockage dans ces compartiments, les scénarios longs, pour lesquels la capitalisation sur pied est supérieure, ajoutent plus de 43 tC/ha au stock moyen. On obtient alors un différentiel de stock de carbone total entre les plantations de Douglas et les peuplements de Hêtre de 63,3 tC/ha avec le scénario « Douglas Ong Long » et de 67,7 tC/ha pour le scénario « Douglas Afocel Long ».

En revanche, sur les stations moins élevées en altitude pour lesquelles les peuplements de Hêtre sont plus fertiles, le différentiel de stock dans le sol est réduit à 15 tC/ha en faveur des plantations de Douglas. Celui-ci est plus que compensé par les stocks de la biomasse et des produits forestiers des peuplements de Hêtre lorsque les sylvicultures de Douglas sont dynamiques. Les scénarios « Douglas Onf Court » et « Douglas Afocel Court » ont des stocks moyens de carbone en régime permanent inférieurs à celui du Hêtre. Lorsque les peuplements de Douglas sont capitalisés plus longtemps, alors le stock moyen est supérieur, et la stratégie de substitution est valable pour le stockage de carbone.

Cependant, il faut rappeler que les sylvicultures appliquées au peuplement de Hêtre sont très dynamiques (RDI finaux inférieurs à 0,4), or dans la partie « Capitalisation sur pied », il apparaît que le potentiel de stockage par capitalisation des peuplements de Hêtre est très fort. Avec une sylviculture moins dynamique pour le Hêtre, le bilan lui serait alors favorable.

II.4 – 3. Conclusion

En conclusion de cette sous-partie, la substitution du Chêne sessile par du Pin laricio est une stratégie défavorable à long terme pour le stockage de carbone.

En revanche, la substitution de peuplement de Hêtre peu fertiles en altitude conduits avec des sylvicultures dynamiques par des plantations de Douglas avec des itinéraires longs est favorable à long terme. L'analyse effectuée compare alors une sylviculture dynamique du feuillu à une sylviculture longue de la plantation de résineux. Nous montrons alors avec ces simulations que pour que la stratégie de substitution d'essence à croissance lente par des plantations de résineux à croissance rapide soit valable à long terme, il faut que plusieurs conditions soient réunies : une mauvaise fertilité pour le feuillu, un scénario sylvicole long pour le résineux, et une sylviculture intensive pour le feuillu.

Pour les peuplements de Hêtre plus fertiles (basses altitudes), le stockage à long terme dépend essentiellement des intensités de sylviculture des deux essences.

Le tableau *B10* illustre les contributions à ces résultats ainsi que leurs sensibilités pour quelques couples de substitution choisis pour leur intérêt : i) pour le couple Chêne / Pin, les situations sont proches, et nous montrons la plus favorable au Pin laricio, qui reste globalement déficitaire (« Chêne 24,2 » / « Pin intensif 15,7 ») ; ii) pour le couple Hêtre / Douglas, les scénarios Afocel sont plus contrastés que les scénarios ONF, nous les montrons pour les deux altitudes.

		Stock moyen sur la révolution (tC/ha)					Ventilation de la production dans les filières				
Couple	Age exploitabilité	Prod. annuelle moyenne (bois fort) en m ³ /ha/an	Sol	Racines	Aérien	Produits	Total	Feu/Papier	Emballage	Construction	Ameublement
Centre - Pays de la Loire	Chêne 24,2	7,5	93	20,8	95,8	10,8	220,4	41,3	-	14,8	43,9
	Pin intensif 15,7	9,5	92,7	14,8	56,1	14,6	178,2	31,1	12,9	13,7	42,3
Massif Central Altitude 300 m	Hêtre 30,0	10,3	101,4	14,8	71,4	10,2	197,4	39,1	29,1	-	31,8
	Douglas Afocel court	15,7	116,7	12,5	48,7	17,2	195,2	13,6	42,7	18,1	25,6
	Douglas Afocel long	14,9	116,7	17,3	79,1	16,5	229,7	6,3	51,1	18,3	24,3
Massif Central Altitude 800 m	Hêtre 21,5	6,4	132,8	11,1	48,8	5,5	198,2	44,7	32,5	-	22,8
	Douglas Afocel court	15,7	152,9	12,5	48,7	17,2	231,4	13,6	42,7	18,1	25,6
	Douglas Afocel long	14,9	152,9	17,3	79,1	16,5	265,9	6,3	51,1	18,3	24,3

Tableau B10 : Bilan des contributions aux stock de carbone dans plusieurs situations de substitution d'essences

On remarque sur ce tableau *B10* plusieurs points :

- Comparaison Chêne sessile / Hêtre :

Les produits issus du Chêne sessile sont immobilisés massivement dans des filières à longue durée de vie puisque 58,7 % sont affectés aux filières ameublement et construction. Cette forte valeur est probablement en partie due à un tarif de cubage assez fort pour les plus gros individus (Bouchon 1974), qui rejoint presque celui du volume total. Le bois fort branches, affecté aux filières papier et bois énergie, étant calculé par différence entre les deux, il peut être un peu sous-représenté.

À l'inverse, pour le Hêtre, 58,2 % à 77,2 % suivant les fertilités sont affectés à des filières de durée de vie courte (Papier/Feu et Emballage), ce qui est cohérent avec les itinéraires très dynamiques qui obligent à sortir beaucoup de petits bois d'éclaircies.

- Comparaison Pin laricio / Douglas

Les deux résineux ont des stocks de carbone dans les produits nettement supérieurs que les feuillus, ce qui était attendu. En effet, ce compartiment bénéficie à la fois de la faible durée de révolution et du placement important dans les filières à longue durée de vie (42,6% à 66%).

La différence entre ces deux essences vient des productivités : autour de 15 m³/ha/an pour le Douglas contre 9,5 m³/ha/an pour le Pin laricio.

- Comparaison des couples de substitution

Une part importante du surplus du Douglas vient du stockage dans le sol (+15 à +20 tC/ha) ; celui-ci vient surtout des apports beaucoup plus importants de carbone par les feuilles et racines (5,06 tC/ha contre 4,3 tC/ha pour le Hêtre) puisque les rapports L/N sont voisins. Ce paramètre est donc très sensible, et malheureusement assez mal renseigné (grande dispersion des données de stocks de carbone du sol ayant servi à recalculer ces apports).

II.4 – 4. Etude du régime transitoire

Les essences à croissance rapide comme le Pin laricio ou le Douglas ont par définition des productivités très importantes. La substitution d'essences permet alors d'absorber plus rapidement le CO₂ atmosphérique que les essences à croissance lente, et induire un stockage additionnel de carbone pendant un certain nombre d'années, même si comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent le bilan à long terme n'est pas nécessairement meilleur.

Dans le cas du couple Chêne sessile / Pin laricio, les figures B51 a) et b) indiquent que lors de la substitution, au cours de la croissance de la première révolution du Pin laricio il y a bien un stockage additionnel dans tous les cas de substitution du résineux. En revanche, à la fin de cette première révolution, on observe un fort déstockage dû à la coupe rase de la plantation, alors que le Chêne sessile continue à croître et donc stocker du carbone. Il est clair, en particulier sur la figure b), que le stock moyen est défavorable au Pin, mais que localement, pendant environ 60 ans, un stock additionnel peut être engendré.

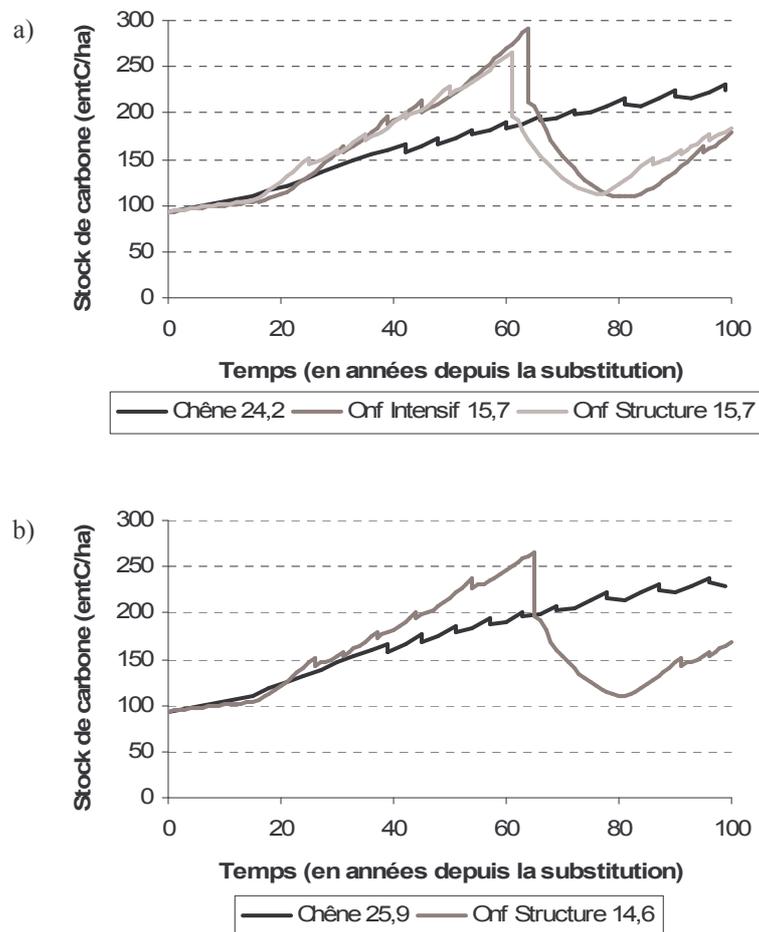


Figure B51 : Evolution du carbone total (en tC/ha) pour le couple Chêne sessile / Pin laricio
a) dans le cas le plus favorable à la substitution
b) dans le cas le moins favorable à la substitution

Pour le couple Hêtre / Douglas, les figures B52 a) et b) montrent l'évolution des stocks dans le cas de la station la plus favorable à la substitution (où la fertilité du Hêtre est la moins bonne) et dans le cas inverse. Seuls les scénarios « Afoce Long » et « Onf Court », qui sont les cas extrêmes des quatre scénarios sont présentés pour ne pas surcharger le graphique.

On observe alors plusieurs points sur ces figures. D'abord, les scénarios court et long pour le Douglas ont sensiblement la même cinétique jusqu'à 42 ans, âge auquel la coupe rase du scénario court libère une grande partie du stock de carbone, alors que le scénario long continue à stocker. Ensuite, comme dans le cas du couple Chêne sessile / Pin laricio, les plantations de résineux engendrent un surstockage temporaire dû à leur forte productivité. Celui-ci est bien plus fort dans le cas de la mauvaise fertilité pour le Hêtre (station d'altitude). Enfin, le stock moyen plus faible dans le cas d'une sylviculture intensive pour le Douglas (« Onf Court ») est très visible pour la bonne fertilité pour le Hêtre.

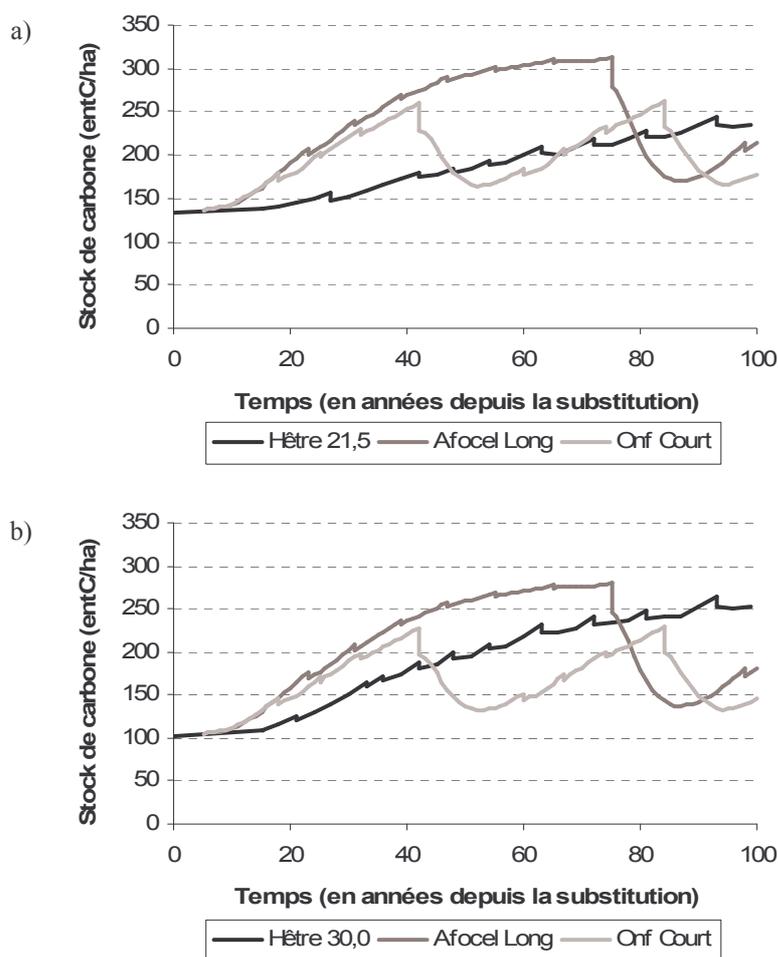


Figure B52 : Evolution du carbone total (en tC/ha) pour le couple Hêtre / Douglas
a) dans le cas le plus favorable à la substitution (Station à 800 mètres d'altitude)
b) dans le cas le moins favorable à la substitution (Station à 300 mètres d'altitude)

La différence maximale de stockage entre les scénarios de feuillus et de résineux ainsi que le nombre d'années après la substitution pour lequel elle intervient sont reportés dans le tableau B11.

Région	Scénario initial	Scénario alternatif	Année de surstockage maximal	Valeur maximale de surstockage
Centre - Pays de la Loire	Chêne 24,2	Pin Intensif 15,7	64 ans	106,5 tC/ha
		Pin Structure 15,7	61 ans	80,2 tC/ha
	Chêne 25,9	Pin Structure 14,6	65 ans	69,1 tC/ha
Massif Central	Hêtre 21,5 (800 m d'altitude)	Douglas Onf Court	42 ans	80,1 tC/ha
		Douglas Afocel Court	51 ans	103,8 tC/ha
		Douglas Onf Long	75 ans	108,6 tC/ha
		Douglas Afocel Long	55 ans	111,6 tC/ha
	Hêtre 30,0 (300 m d'altitude)	Douglas Onf Court	39 ans	40,0 tC/ha
		Douglas Afocel Court	51 ans	60,3 tC/ha
		Douglas Onf Long	51 ans	56,1 tC/ha
		Douglas Afocel Long	45 ans	66,0 tC/ha

Tableau B11 : Différentiels de stocks maximaux après substitution d'essence
Pour les zones géographiques Centre - Pays de la Loire (départements Cher, Loir-et-Cher, Maine-et-Loire, Mayenne et Sarthe)
et du Massif Central (département Allier, Corrèze, Creuse, Haute-Loire, Lozère et Haute-Vienne)

Le tableau *B11* montre que dans tous les cas, la substitution d'essence est favorable aux plantations de résineux pour plusieurs décennies, même si le bilan à long terme est inverse. En effet, la valeur minimale est de 40,0 tC/ha en 39 ans lors de la substitution du Hêtre de bonne fertilité par un peuplement de Douglas avec une sylviculture intensive. La valeur maximale est de 111,6 tC/ha en 55 ans (soit plus de 2 tC/ha/an) lorsque le Douglas remplace un peuplement de Hêtre de mauvaise fertilité.

Il est possible d'envisager une substitution du Chêne sessile par du Pin laricio en région Centre – Pays de la Loire, et du Hêtre par du Douglas dans le Massif Central afin d'accroître le stockage de carbone sur ces surfaces forestiers. Le bilan est positif pendant plusieurs décennies en terme de différentiels de stock de carbone dans tous les cas, même si les peuplements de feuillus ont de bonnes productivités.

En revanche, pour le couple de substitution Chêne sessile / Pin laricio ce surstockage est temporaire et ne donne qu'un répit dans la lutte contre les gaz à effet de serre puisqu'après la première révolution du résineux, le stock retourne très rapidement à l'atmosphère.

Le constat est identique lorsque des peuplements de Douglas se substituent à des stations de Hêtre de bonne fertilité.

Par contre, il semble que pour les stations peu fertiles de Hêtre, l'installation du Douglas est plus favorable qu'une sylviculture dynamique du feuillu.

L'intérêt de la substitution d'essences dépend alors de l'échelle de temps à laquelle on est confrontés. Si l'objectif est un stockage rapide et immédiat du carbone pour 40 à 60 ans, la substitution de feuillus à croissance lente par des résineux à croissance rapide est une stratégie qui pourrait porter ses fruits, en particulier sur les stations pauvres. Ces choix permettraient alors de stocker du carbone pendant quelques décennies, en espérant que d'ici-là des solutions énergétiques pourraient remplacer les pratiques émettrices en CO₂ actuelles.

En revanche, cette substitution n'est probablement pas la meilleure stratégie à plus long terme, voire très défavorable dans certains cas. A l'échelle d'un ou plusieurs siècles, le stockage de carbone serait supérieur en gardant les feuillus à croissance lente, pour lesquels la capitalisation sur pied engendrerait des stocks moyens supérieurs.

Discussion générale

1 – Les modèles utilisés

Le travail qui vient d'être présenté s'articule autour de l'assemblage, pour chacune des quatre essences considérées – Chêne sessile, Hêtre, Pin laricio, Douglas – d'une chaîne de modèles soit issus de la littérature, soit précédemment développés au laboratoire, soit construits au cours de l'étude. Tous ces modèles n'ont pas le même degré de précision, et le bilan doit alors être fait en indiquant en particulier les points les plus délicats.

Cette analyse doit être faite en regard des résultats déjà obtenus : une précision assez faible sur un compartiment de stock négligeable par rapport aux autres n'est pas grave, alors qu'une précision seulement moyenne sur un gros compartiment est plus critique. La réactivité aux stratégies sylvicoles envisagées est également un point clef.

1 – 1. Evolution des peuplements

Le peuplement forestier représente à la fois un des compartiments de carbone les plus importants, et un de ceux pour lesquels les variations sont les plus fortes. Il est alors de toute première importance. Les modèles utilisés pour cette partie sont répertoriés dans le tableau 1.

1 – 1.1. Les modèles de croissance

L'ensemble de la chaîne est pilotée par les modèles de croissance forestière. Ceux-ci ont été développés à partir de nombreux relevés dendrométriques et sont assez robustes pour l'étage principal. Des travaux de validation ont été effectués sur ces modèles. Pour *Fagacées*, ils concernent la qualité des prévisions de la production peuplement et de la croissance du diamètre dominant. Ils ont été menés pour partie sur les données de calibration (validation à long-terme d'un modèle calibré sur le court-terme), pour partie sur données externes choisies pour leur éloignement géographique et leur gamme de sylviculture plus large que la base de données calibration. Pour le Hêtre, des tests ont été menés sur les essais de Souilly et de Totterup (Danemark), avec des RDI stabilisés autour de 0,15 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,45 puis une gamme allant jusqu'à 1 (Dhôte 1995, 1997). Pour le Chêne, des tests sur l'essai de Réno-Valdieu sont effectués, pour des Rdi allant de 0,5 à 1 (Nepveu et Dhôte 1998). Le modèle *Simcop* a été validé avec le carré latin de Douglas de la forêt d'Amance (Ottorini 1995). Des travaux de validation de *Pnl* ont également été menés au Cemagref (Belingard *et al.* 2002).

1 – 1.2. Le sous-étage

Le sous-étage n'est en revanche pas pris en compte, et dans le cas des feuillus, il peut représenter un compartiment non négligeable, en particulier si l'étage principal est ouvert. Patenaude *et al.* (2003) ont estimé sur cinq plantations de feuillus en Angleterre des stocks de carbone du sous-étage égaux à 25 % de l'étage principal. Cette valeur est ramenée à seulement 10 % pour le peuplement le plus dense. Ces valeurs sont probablement bien supérieures à celles des futaies régulières que l'on simule dans cette étude pour deux raisons : i) l'étage principal des futaies régulières est plus haut que celui des plantations anglaises, induisant alors un stock de carbone supérieur, ii) les plantations anglaises considérées sont des peuplements assez clairs où le sous-étage s'installe probablement plus facilement. Duvigneau *et al.* (1969) indiquent la biomasse des différents compartiments de plusieurs taillis-sous-futaie de Chêne en Belgique : le rapport de la biomasse du sous-étage par rapport à la biomasse aérienne ligneuse totale est pour les forêts de Ferage : 7,0% ; Wavreille : 8,9% ; Villers I : 18,3% et Villers II : 15,8%. Pour la jeune futaie en

conversion de Virelle, il est de 2,2%. Dans les cas de Ferage et Wavreille, le sous-étage est essentiellement composé de Noisetier et de Charme, alors qu'il est de Chêne pour les deux forêts de Villers. Une correction pour le sous-étage serait donc nécessaire dans nos simulations lorsque les peuplements sont très clairs, mais sont négligeable pour les futaies plus denses. Si les nombreuses conversions de taillis-sous-futaie en futaie doivent être appréhendés avec précaution, le sous-étage de nos futaies régulières n'est probablement un point critique que pour les peuplements les plus clairs. Cette non prise en compte du sous-étage a pour effet d'exagérer la différence entre les sylvicultures.

1 – 1.3. Les tarifs de cubage

L'estimation des stocks de carbone de la partie aérienne est source de nombreuses autres erreurs. Lors de l'estimation du carbone d'un individu, les erreurs sur le volume, l'infradensité et le taux de carbone sont multipliées.

Les volumes aériens totaux sont estimés de manière robuste. En effet, les tarifs de cubages utilisés sont construits sur de nombreuses données, et grâce à l'utilisation d'une variable représentant la robustesse de l'individu dans les tarifs de cubage, ils sont adaptés même pour des sylvicultures assez contrastées (Vallet *et al.* 2005). Pour le Douglas, une validation a été présentée §A.I.2 – 1.3, et montre l'excellente adéquation des tarifs de cubage ainsi construits avec les estimations de la biomasse dans le modèle *Simcop* (Ottorini *et al.* 2002).

1 – 1.4. L'infradensité

De même que pour les tarifs de cubage, l'infradensité est probablement bien estimée, grâce à l'utilisation de modèles cerne à cerne construits sur de grandes bases de données. Le modèle développé par Gilles Le Moguédec pour le Chêne sessile est basé sur 7483 observations, celui de Jean-Michel Leban pour le Pin laricio sur 13 104 observations, et celui de Jean-Daniel Bontemps pour le Hêtre sur 5759 observations.

Pour le Hêtre, il s'agit d'un modèle de densité sèche à l'air, et non d'infradensité, et le coefficient de passage de l'un à l'autre mériterait en revanche d'être mieux estimé.

1 – 1.5. Le taux de carbone

La valeur forfaitaire du taux de carbone de 0,475 est très certainement améliorable avec des données dépendant de l'essence et de l'âge du cerne considéré. Des mesures ont été réalisées par compartiment par Huet (2004) et montrent malgré tout des valeurs assez stables. Il est en particulier intéressant de noter que les valeurs qu'elle mesure pour l'écorce (0,490 en moyenne) et pour les racines (0,485) sont assez proches de celle que l'on utilise.

Notons que pour les estimations de stocks de carbone à l'échelle nationale des différents pays européens, les valeurs forfaitaires utilisées sont à des rares exceptions près soit 0,45, soit 0,50 suivant les pays, et rarement dépendantes des essences, ni même du groupe feuillu ou résineux (Löwe *et al.* 2000).

<i>Essence</i>	<i>Modèle de Croissance</i>	<i>Volume aérien</i>	<i>Infradensité</i>	<i>Biomasse racinaire</i>	<i>Taux de carbone</i>
<i>Chêne sessile</i>	Fagacées (J.-F. Dhôte)	Tarif de cubage (Vallet <i>et al.</i> 2005)	Modèle infradensité (G. Le Moguédec)	Relation allométrique en extrapolation (Drexhage <i>et al.</i> 1999)	Taux fixe 0,475 Carbofor (Loustau 2004)
<i>Hêtre</i>	Fagacées (J.-F. Dhôte)	Tarif de cubage (Vallet <i>et al.</i> 2005)	Modèle de densité sèche à l'air (Bontemps <i>et al.</i> 2005a) × Coefficient de passage (Tessier du Cros 1981)	Relation allométrique du Chêne en extrapolation (Drexhage <i>et al.</i> 1999)	Taux fixe 0,475 Carbofor (Loustau 2004)
<i>Pin laricio</i>	Pnl (Meredieu 1998)	Tarif de cubage (Vallet <i>et al.</i> 2005)	Modèle d'infradensité (J.-M. Leban)	Relation allométrique du Chêne en extrapolation (Drexhage <i>et al.</i> 1999)	Taux fixe 0,475 Carbofor (Loustau 2004)
<i>Douglas</i>	Simcop (Ottorini <i>et al.</i> 2002)	Calcul interne Simcop (Ottorini <i>et al.</i> 2002)	Calcul interne Simcop (Ottorini <i>et al.</i> 2002)	Relation allométrique (Thies et Cunningham 1996)	Taux fixe 0,475 Carbofor (Loustau 2004)

Tableau 1 : Récapitulatif des modèles utilisés pour la partie peuplement des simulations

1 – 2. Les biomasses racinaires

Ensuite, l'estimation des biomasses racinaires est une gageure, et le point le moins bien estimé de la biomasse en particulier pour les plus gros individus. Les études sont à la fois peu nombreuses, et comportent des effectifs généralement petits et constitués d'arbres de faible diamètre. L'utilisation d'une relation allométrique unique pour le Chêne sessile, le Hêtre et le Pin laricio semble plus raisonnable que l'extrapolation des relations spécifiques disponibles dans la littérature (cf. §A.I). Il y a alors des biais inter-spécifiques probables, mais également intra-spécifiques, puisqu'on peut s'attendre à une réaction différente des arbres en fonction du milieu (par exemple avec la réserve utile du sol).

Il est rarement possible de comparer précisément les résultats obtenus avec ceux de la littérature : en effet, la biomasse que l'on simule est estimée à l'échelle du peuplement comme la somme des biomasses de tous les individus, et rares sont les études où toutes les informations sont réunies pour que la comparaison soit correcte. En particulier, des études indiquent la biomasse des peuplements sans nécessairement préciser les hauteurs moyennes ou dominantes, les nombres de tiges, les diamètres moyens et même s'il s'agit de biomasse sèche à l'air, ou anhydre. Or un des résultats de l'étude de la capitalisation sur pied est la grande différence de stockage dans la biomasse entre les peuplements clairs et le peuplement denses.

On préférera alors comparer le ratio carbone racinaire / carbone aérien qui est assez stable sur la révolution, et permet d'éviter une partie de ce problème. Cependant rappelons que les relations allométriques utilisées sont basées sur le diamètre seul, alors que les tarifs de cubage pour le volume aérien prennent en compte la hauteur de l'arbre. Il s'ensuit que la fertilité influe sur ce rapport dans les simulations : plus le peuplement est fertile, plus les arbres sont hauts et plus la biomasse est importante, ce qui diminue le ratio.

Les études indiquant à la fois la biomasse aérienne et la biomasse racinaire (ou l'équivalent en stocks de carbone) sont rares dans la littérature, et nous associons alors le Chêne pédonculé et le Chêne sessile d'autant plus volontiers que Thomas (2000) note la similitude entre les deux essences. Kozak et Holubets (2001) indiquent pour quatre peuplements de Chêne pédonculé assez peu fertiles des Carpathes des valeurs de biomasses induisant les ratios biomasse racinaire / biomasse ligneuse aérienne suivants : 0,36 (peuplement de 33 ans) ; 0,29 (peuplement de 54 ans) ; 0,28 (peuplement de 75 ans) ; 0,25 (peuplement de 106 ans). On retrouve la diminution aux jeunes âges déjà notée dans la partie A.I de cette étude, mais avec des valeurs légèrement plus élevées. Les peuplement de Kozak et Holubets sont notés peu fertiles, mais sans indiquer de hauteur dominante. Si l'on utilise un indice de fertilité faible pour nos forêts (20 mètres à 100 ans), on obtient pour les mêmes âges avec *Fagacées* les ratios suivants : 0,25 (33 ans) ; 0,24 (54 ans) ; 0,23 (75 ans) et 0,23 (105 ans). Compte tenu de toutes les approximations faites, les valeurs sont très acceptables.

Pour le Pin laricio, de nouveau le manque de données incite à se référer à une essence proche. Helmisaari *et al.* (2002) ont étudié trois peuplements de Pin sylvestre à trois âges différents pour lesquels le ratio est respectivement 0,39 (15 ans) ; 0,30 (35 ans) et 0,16 (100 ans). Dans nos simulations de Pin laricio, on a les rapports 0,48 (15 ans) ; 0,33 (33 ans) et 0,24 (64 ans, âge maximum des simulations), supérieurs à ceux d'Helmisaari, alors que nous avons pourtant déjà rejeté le tarif racines du Pin sylvestre (Laiho et Finer 1996) pour garder celui du Chêne sessile (Drexhage *et al.* 1999), bien inférieur (§A.I.2 – 2.).

Enfin, pour le Hêtre et le Douglas, Bartelink (1998) a établi des modèles de partition des biomasses dans les compartiments d'un arbre moyen donnant des rapports très proches de ceux de nos simulations (figure 1).

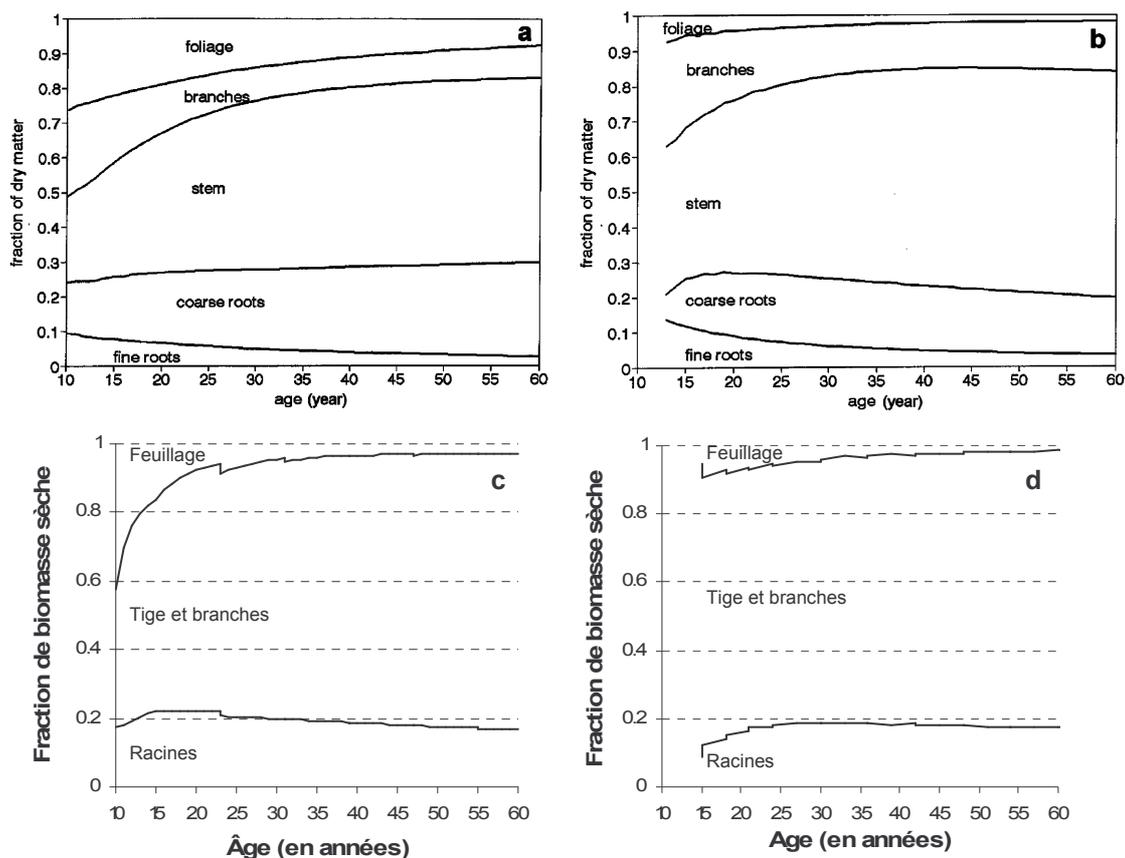


Figure 1 : Répartition de la biomasse sèche par compartiment pour un arbre moyen
 a) Douglas, b) Hêtre. Source : Bartelink 1998
 Répartition de la biomasse sèche par compartiment pour l'ensemble du peuplement
 c) Douglas, scénario « Douglas Afocel long »,
 d) Hêtre, peuplement simulé avec Fagacées :
 $H_{100} = 27$ m en 1995, date de naissance 1995, RDI moyen 0,6

Ces comparaisons n'ont certainement pas la même valeur qu'une validation avec un jeu de données établi de manière indépendante pour valider le modèle, ce qui ne serait pas économiquement faisable, mais elles permettent de s'assurer que l'extrapolation des relations allométriques utilisées pour les biomasses racinaires et le passage à l'échelle du peuplement par la sommation de la biomasse de tous les individus ne diverge pas vers des valeurs aberrantes.

Enfin, le feuillage est un autre compartiment pour lequel des valeurs forfaitaires ont été utilisées, mais sa faible contribution au stock de carbone total le rend assez peu sensible. Les erreurs qu'il engendre sont minimales comparées aux stocks moyens globaux.

1 – 3. Carbone du sol

Le carbone du sol est un des points les plus délicats à appréhender, comme le montre la dispersion des observations de stock dans cette étude, de même que dans celle de Nys (2001) pour les sols forestiers français. La littérature sur le sujet elle-même est contradictoire : en 1981, Covington publie les résultats d'une étude sur l'évolution du carbone des sols d'une chronoséquence de 14 peuplements de feuillus montrant qu'un minimum est obtenu 15 ans après une coupe rase, avec une perte de 50% du carbone. Cet article a fait référence, puis a été mis en doute suite à de nouvelles mesures contradictoires six ans plus tard sur les mêmes sites (Federer 1984). D'autres articles sont parus ensuite sur des sujets semblables montrant l'inverse (Johnson et

Curtis 2001) : le stock de carbone du sol pourrait augmenter fortement (+18%) suite à l'apport considérable en rémanents après une coupe rase. En 2003, l'article de synthèse de Yanai *et al.* montre que le problème n'est pas encore élucidé.

Plutôt que de reconstruire un modèle de carbone du sol, nous avons préféré 1) utiliser le modèle *Century*, dont nous avons justifié l'utilisation par une analyse de sensibilité et par la construction d'un modèle statique de carbone du sol, et 2) calibrer les apports de matière (chutes de litière et turnover racinaire) pour que les résultats des simulations soient en cohérence avec les observations de deux grandes bases de données : les réseaux européen et RENECOFOR.

Cette méthode ne permet certes pas d'estimer les variations à court terme de la sylviculture, cependant, elle permet de donner des résultats assez corrects, par rapport aux grandes incertitudes sur le carbone du sol, sur le moyen terme.

D'autre part, une étude des chutes de litière basée sur les données du réseau RENECOFOR n'a permis de mettre en évidence ni un effet de la sylviculture, ni un effet de l'âge du peuplement sur la production de litière. Cela pourrait venir de la rapidité avec laquelle la canopée se referme. Si l'on considère que la biomasse de racines fines est proportionnelle à celle du feuillage (Brouwer 1962, Reynolds et Thornley 1982, Bartelink 1998, Vanninen et Makela 1999, Cronan 2003), alors on peut supposer que celle-ci ne dépend pas non plus de ces facteurs. Il s'ensuit que l'âge et l'intensité de la sylviculture n'influent pas sur le stock de carbone du sol. Cette hypothèse est forte et probablement discutable puisqu'on imagine plutôt qu'avec la densification des peuplements, moins de lumière arrive au sol et la décomposition s'en trouve ralentie, engendrant des stocks de carbone plus élevés.

Pourtant, ces variations de stocks sont probablement assez marginales : elles n'affectent que les couches de surface, alors que le stock des couches plus profondes varie plus lentement (Gaudinski *et al.* 2000, cité dans Peltoniemi *et al.* 2004). Peltoniemi *et al.* (2004) ont utilisé un simulateur de croissance de peuplement de Pin sylvestre et d'Epicéa commun pour générer des apports de litière et de turnover racinaire au modèle de sol *Yasso* (Karjalainen *et al.* 2002, Liski *et al.* 2005) et obtiennent les résultats de la figure 2 pour 8 peuplements en Finlande. Ces résultats font apparaître qu'après la coupe rase, le stock dans le sol croît initialement très rapidement, suite aux apports par les rémanents, puis diminue pour atteindre un minimum après 20 ans. Ensuite, le stock de carbone du sol augmente jusqu'à l'état de régime permanent entre 50 et 75 ans après la coupe rase.

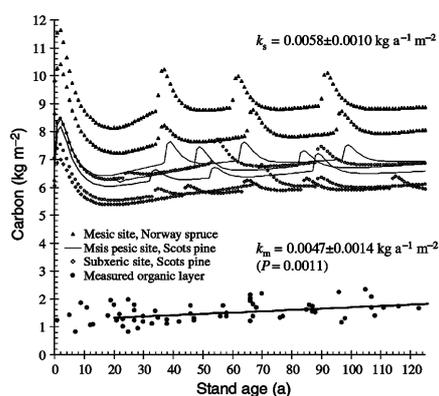


Figure 2 : Evolution du carbone du sol (couches holorganiques + minérales jusqu'à 1m de profondeur) de 8 peuplements de Pin sylvestre et d'Epicéa en Finlande
Résultats de Peltoniemi *et al.* (2004)

Ce graphe fait apparaître i) la rapidité avec laquelle le carbone des rémanents est décomposé après les éclaircies, sans laisser d'arrière effets ii) la vitesse avec laquelle le régime permanent est atteint, iii) la faible part de variation du stock de carbone du sol avec l'âge du peuplement (points mesurés, en bas du graphe, et pente k_m de la droite impliquant + 4,7 tC/ha en 100 ans).

On considérera alors que les variations de carbone du sol sur la longueur d'une révolution en cas de capitalisation sur pied sont effectivement négligeables par rapport aux variations de la biomasse aérienne. Il serait néanmoins possible d'améliorer nos estimations en couplant directement *Fagacées* avec un modèle de sol de type *Yasso* (Karjalainen *et al.* 2002, Liski *et al.* 2005), qui permet, à l'inverse de *Century*, de répartir les apports de carbone directement dans les différents compartiments du modèle suivant des critères physiques mesurables. Cela demanderait un travail important d'expérimentation et de calibration.

Dans le cas de la stratégie de substitution d'essences, la méthode utilisée ne permet pas non plus d'appréhender les variations à court terme du carbone du sol. La méthode employée (calcul indirect des apports de carbone pour converger à l'équilibre vers les valeurs observées avec les grandes bases de données des réseaux européen et RENECOFOR) permet d'aboutir à des valeurs proches de celles des deux réseaux, et elle est alors très fortement conditionnée par la qualité de l'estimation des stocks par essences, or ceux-ci présentent une variabilité importante.

En particulier, cela induit une valeur d'apports de carbone très élevée pour le Douglas, qui contribue beaucoup au bon résultat de cette essence (+15 tC/ha et +20 tC/ha dans le cas de la substitution du Hêtre par du Douglas à respectivement 300 mètres et 800 mètres d'altitude). Ranger (2003) a suivi une chronoséquence de peuplements de Douglas dans les monts du Beaujolais en France, et donne des valeurs de chutes de litières entre 3,34 tMS/ha/an et 3,95 tMS/ha/an, soit entre 1,77 tC/ha/an et 2,01 tC/ha/an lorsqu'on applique un taux de carbone de 52,9 % (§A.II.4 – 1.5). Cette valeur est bien supérieure à celle que nous avons calculée à partir des données de chutes de litière du réseau RENECOFOR. En revanche, les apports calculés indirectement que nous utilisons sont de 5,062 tC/ha pour l'ensemble des chutes de litière et du turnover racinaire, ce qui paraît alors assez élevé.

Dans les simulations de capitalisation sur pied pour le Chêne sessile et le Hêtre, dans le cas des fertilités moyennes, le carbone de la matière organique du sol représente de 35 % à 60 % du carbone total suivant les différents scénarios, or c'est un des compartiments les moins bien estimés. Cependant, les variations de stocks en fonction de la sylviculture sont assez faibles dans ce compartiment. Si les estimations de stock à l'hectare sont biaisées à cause du manque de précision de ce compartiment, on peut en revanche considérer que les variations de stocks engendrés par des sylvicultures différentes n'en souffrent que peu.

1 – 4. Produits forestiers

Dans le cas des feuillus comme dans celui des résineux, l'analyse effectuée pour l'estimation des produits forestiers a conduit à des valeurs moyennes de stocks bien inférieures à ceux de la biomasse forestière. Ce compartiment n'est donc pas critique et même des erreurs importantes seraient de peu de conséquence sur les résultats finaux.

La raison de ce stock très faible tient à la fois à la faible durée de vie des produits en comparaison avec la durée de la révolution de la forêt, et au faible pourcentage du bois d'œuvre devenant des produits finis en raison des rendements matière.

Prieur (2004) a effectué une analyse similaire dans sa thèse mais à une échelle beaucoup plus large et du point de vue de l'énergéticienne. Le tableau 2, extrait de cette thèse, synthétise les maigres sources bibliographiques existantes sur les durées de vie des produits bois. Les valeurs retenues dans la thèse de Prieur sont également notées. Dans notre étude, nous utilisons les valeurs du rapport du CTBA (Paquet et Deroubaix 2003).

Loi	Energie	Construction	Ameublement	Emballage	Papier/carton	Source
Echelon	1	40	40	40	3	Buchanan et Levine 1999
Echelon	2	40	20	7	2	Paquet et Deroubaix 2003
Exponentielle	1	70 à 150	15	1 à 2	1	Thompson et Matthews 1989
Exponentielle	-	40	-	-	-	Pingoud <i>et al.</i> 2001
Echelon	-	50 à 100	-	-	-	Börjesson et Gustavsson 2000
Echelon	-	30 à 50	-	-	-	Richter 1998
Exponentielle	1	100	20	10	5	Marland et Marland 2003
Echelon	1	40	20	7	2	Prieur 2004 (valeurs retenues)

Tableau 2 : Durées de vie (en années) des produits du bois selon diverses sources
Extrait de la thèse d'Anne Prieur (2004)

D'autres études simulant de manière intégrée le stockage de carbone et prenant en compte les produits forestiers montrent des résultats similaires aux nôtres. Ainsi, Dewar et Cannell (1992) estiment que la durée de vie des produits (95% de retour à l'atmosphère) est égale à la longueur de la révolution. Ils obtiennent alors un stock moyen de 34 tC/ha, soit 16% du carbone total (y compris le sol). Ils ont mené une analyse de sensibilité en doublant et en divisant par deux la durée de vie du produit, et considèrent que le changement est mineur en raison de la faible part de ce compartiment. De même, Liski (2001) comme nous l'avons déjà indiqué dans la partie B.II fait également une étude détaillée pour du Pin sylvestre en Finlande en classant les produits par catégories (papier, construction, ameublement) et obtient des résultats très proches des nôtres puisque les produits représentent 19,5 % de la biomasse totale (donc sans le compartiment sol), et que dans nos simulations de Pin laricio, ils représentent 20,1 % ou 20,6 % suivant les sylvicultures.

Karjalainen (1994) a publié des résultats un peu plus optimistes sur le stockage dans les produits forestiers puisqu'il a estimé dans cette étude que deux tiers du bois d'œuvre exporté de la forêt devient des produits finis, et qu'après 50 ans et 100 ans, 40 % et 33 % de ceux-ci sont encore place et participent au stock de carbone. En utilisant ces résultats, il estime deux ans plus tard (Karjalainen 1996) que pour un peuplement de Pin sylvestre et un autre d'Épicéa du nord de la Finlande, les produits représentent un stockage d'environ 30 % de celui de la biomasse. Enfin, dans un dernier article ayant pour cadre les stocks de carbone des forêts allemandes (Karjalainen *et al.* 2002), ses estimations de durées de vie sont revues à la baisse et il indique un stockage dans les produits forestiers égal à 7,7 %, très proche de nos valeurs. Une des plus grandes incertitudes sur le stock des produits forestiers est la vitesse de décomposition de ceux qui ne sont pas réutilisés en bois énergie, et restent stockés dans les décharges.

Les valeurs obtenues dans notre étude sont proches de celles des autres études récentes, et de surcroît le stock global est faible. On peut alors considérer que l'estimation de ce compartiment est correcte et ne provoque pas de biais dans les résultats.

Cependant, même si les résultats sont probablement peu biaisés, on peut rappeler les hypothèses assez fortes qui ont été utilisées et les éléments qui pourraient être améliorés.

D'abord, la perte de spécificité du bois une fois sorti de la forêt pourrait avoir une importance dans le cas où la filière dans laquelle il est affecté aurait des sous-filières hétérogènes. En effet, on peut par exemple penser que le bois de Douglas est beaucoup utilisé en charpente, et moins en agencement. Cela peut induire des différences de répartition intra-filière qui modifieraient la durée de vie apparente. De même, dans la filière emballage, les résineux sont

beaucoup utilisés pour faire des palettes (durée de vie de 72 mois), alors que le Hêtre sera plus utilisé pour des caquettes (durée de vie de 1 mois).

Ensuite, les billonnages des arbres comportent des lacunes. Pour les feuillus, les usages sont mal renseignés, et les seules sources disponibles sont anciennes. Il est probable que depuis le rapport de Flammarion (1986) que nous avons utilisé, les industries des merrains (filiale emballage) et des panneaux (filiale ameublement) se soient largement développées. Le bois utilisé pour les panneaux provient de petits diamètres, et viendrait donc en remplacement des filières papier-carton et bois énergie, ce qui entraînerait une durée de vie plus importante. A l'inverse, le bois pour les merrains (gros diamètres) viendrait à la place de bois affecté à l'ameublement dans nos simulations, soit une diminution de la durée de vie apparente. Pour les résineux, si le classement des planches est bon grâce au simulateur *WinEpiFn*, l'estimation du volume bois fort affecté aux filières papier-carton et bois énergie se fait par l'application du facteur d'expansion branche du rapport Carbofor (Loustau 2004), unique pour tous les résineux de tous diamètres.

2 – Bilan des résultats

Le travail entrepris pour cette étude permet de comparer à l'échelle de la parcelle le stockage de carbone en fonction de la sylviculture pour les deux plus grands feuillus sociaux français, à la fois en ce qui concerne la capitalisation sur pied, et la substitution par des essences résineuses à croissance rapide.

Quelques études existent qui comparent les stocks dans la biomasse et / ou dans les produits forestiers et le sol pour des sylvicultures contrastées, en particulier pour les plantations de Pin sylvestre ou d'Epicéa en Finlande. En revanche, il n'existe pas dans la littérature d'études comparant des plantations de résineux et des peuplements de feuillus sur des sites identiques.

2 – 1. La capitalisation sur pied

Les principaux résultats obtenus montrent que la capitalisation sur pied des deux feuillus est une option qui permettrait de stocker de grandes quantités de carbone. Ces valeurs dépendent peu de la fertilité : pour une mauvaise station de Chêne sessile, la différence en régime permanent entre une sylviculture très dynamique et une sylviculture très dense s'élève à 71 tC/ha, pour une bonne station à 78 tC/ha et pour une très bonne fertilité à 86 tC/ha. Cela représente un gain de 44 % à 48 % des stocks de carbone initiaux. Ces valeurs sont encore plus importantes dans le cas du Hêtre puisque les différences entre les sylvicultures très dynamiques et denses sont de 130 tC/ha, 135 tC/ha et 142 tC/ha pour des fertilités faible, bonne et très bonne, soit 64 %, 66 %, et 67 % des valeurs initiales. Ces augmentations de stock de carbone avec la densité des peuplements sont dues à la fois au rallongement des durées des révolutions pour atteindre le diamètre d'exploitabilité, et au stock sur pied supérieur dans la biomasse pour un âge donné. Le sous-étage n'est cependant pas pris en compte dans les simulations et doit atténuer un peu ce constat, car il est plus développé dans les peuplements clairs.

On note que le stock de carbone moyen sur la révolution est plus sensible à la densité finale qu'à la densité initiale, et que la sensibilité au diamètre dominant d'exploitation est faible pour le Chêne et plus forte pour le Hêtre lorsque la sylviculture est prudente.

Hynynen *et al.* (2005) présentent des résultats de simulations pour trois types de peuplements en Finlande : i) un peuplement d'Epicéa commun pur géré classiquement, ii) un peuplement d'Epicéa commun en mélange avec des essences feuillues pour maintenir la biodiversité (Tremble, Bouleau pubescent, Aulne blanc), iii) un peuplement d'Epicéa initialement mélangé, où aucune intervention n'est pratiquée. 70 ans après la plantation, le stock dans la biomasse est environ de 132 tC/ha pour les peuplements pur et mélangé, alors qu'il est de

185 tC/ha pour le peuplement sans intervention. Le carbone du sol varie peu entre ces différentes simulations puisqu'après 70 ans il est de 78 tC/ha pour le peuplement pur, de 80 tC/ha pour le peuplement mélangé, et de 83 tC/ha pour le peuplement sans intervention. Cette différence n'est pas directement comparable à nos résultats puisqu'il ne s'agit pas des mêmes essences, et que les auteurs font le bilan après 70 ans alors que nous comparons les valeurs moyennes de carbone sur la révolution, mais ils montrent des tendances similaires, à savoir une forte augmentation dans la biomasse lorsque l'on densifie la forêt, et une faible variation du carbone du sol.

Pour des plantations d'Epicéa de Sitka au Pays de Galles, Bateman et Lovett (2000) présentent des résultats similaires.

Ce résultat montre l'intérêt des peuplements hyperdenses, comme les peuplements en réserve. Cependant, il faudrait également effectuer une analyse des divers risques encourus comme les tempêtes, les feux, les pestes etc. qui pourraient modifier les bilans par l'augmentation de la vulnérabilité de ces forts stocks.

Les objectifs de stockage de carbone sont probablement conciliables avec les objectifs forestiers pour le Chêne. En effet, un peuplement dense permet d'obtenir des bois de qualité. En revanche, il y a un conflit dans le cas du Hêtre dont les largeurs de cerne élevées sont plus prisées et dont la croissance doit être rapide pour l'objectif commercial, donc avec des sylvicultures intensives.

2 – 2. La substitution d'essence

En cas de récolte finale d'un peuplement de feuillu à croissance lente, la question de l'essence de reboisement se pose. Vaut-il mieux régénérer le peuplement avec la même essence, ou bien est-il préférable de choisir l'alternative d'une essence résineuse à croissance rapide, en vue de stocker le carbone ?

Nous avons montré que le choix est dépendant à la fois de la fertilité différentielle des deux essences, et de l'échelle temporelle à laquelle on se place.

De manière générale, on peut affirmer avec cette étude qu'en régime permanent, la substitution d'une plantation de résineux ne peut éventuellement être valable que si le peuplement feuillu est de faible fertilité alors que le terrain convient bien au résineux alternatif, et uniquement dans le cas où le feuillu serait conduit avec une sylviculture très intensive et le résineux avec un scénario long. Ce peut être le cas pour la substitution du Hêtre par des peuplements de Douglas en altitude.

En revanche, pendant les premières décennies suivant l'installation du peuplement, la plus forte productivité des résineux engendrerait systématiquement un stockage de carbone supérieur, pouvant atteindre 111 tC/ha en 55 ans dans le cas le plus favorable. Mais ce surstockage serait de courte durée car les révolutions des résineux sont plus courtes, le carbone aurait un retour à l'atmosphère beaucoup plus rapide, et l'on observerait alors ensuite une inversion de cette tendance.

La seule référence disponible dans la littérature comparant le stockage de carbone de feuillus et de résineux sur l'ensemble des compartiments biomasse, produits forestiers et sol (Bateman et Lovett 2000) ne compare pas les deux essences (Epicéa de Sitka et Hêtre au Pays de Galles) sur des sites identiques. L'auteur note cependant que le changement d'essences influe moins sur le stock de carbone que l'intensité de la sylviculture, ce qui est également le cas dans nos simulations.

Notons également qu'il serait intéressant de connaître l'impact de ces substitutions sur les stocks de méthane en Forêt. En effet, Borken (2003) indique que la conversion de peuplements de Hêtre en plantations d'Epicéa et de Pins sylvestre en Allemagne a induit une forte diminution des

absorptions de ce gaz également très nocif pour l'effet de serre. Pour intégrer le méthane dans nos simulations, des modèles supplémentaires seraient nécessaires, mais ceux-là n'existent pas actuellement et l'opération demanderait alors un travail hors de notre cadre d'étude.

Ces aspects quantitatifs ne doivent pas être utilisés sans prendre en compte les corollaires environnementaux, économiques et socioéconomiques (Besnehard et Peyron 2000). L'impact de la sylviculture sur la biodiversité est un sujet qui inquiète la communauté scientifique : 2 524 articles de recherche répondent aux critères d'une requête dans la base bibliographique « Cab Abstracts » avec les mots clefs « Biodiversity » + « Forest Management ». D'autre part, des modifications profondes de la sylviculture modifieraient l'approvisionnement de la filière bois qui compte environ 500 000 emplois en France.

3 – Perspectives

3 – 1. Améliorations

Plusieurs points pourraient raisonnablement être améliorables à court ou moyen dans les chaînes de modèles construites pour répondre à la question de l'impact de la sylviculture sur le stockage de carbone dans les peuplements forestiers.

On pourrait tout d'abord établir un meilleur modèle pour estimer l'évolution du carbone du sol. De nombreuses données longitudinales seraient nécessaires pour le calibrer, ce qui est rare et cher. Le récent modèle *Yasso*, décrit dans un article à paraître (Liski *et al.* 2005) est assez séduisant dans la mesure où il permet, contrairement à *Century*, de répartir directement les apports de matière dans les compartiments qui le composent en fonction de critères mesurables. Il n'est pas établi pour connaître les flux à des pas de temps fins, mais bien pour estimer l'évolution du carbone des sols à l'échelle forestière ; le pas de temps est l'année. Les entrées sont assez simples puisqu'il nécessite la production de litière, des informations sur la qualité de celle-ci, et des paramètres climatiques, disponibles dans le contexte français avec le modèle *Aurelhy* de Météo France (Bénichou et le Breton 1987) .

Ensuite, la comptabilité de la biomasse sèche du Hêtre pourrait bénéficier d'un modèle d'infradensité meilleur que celui qui est utilisé. Si le modèle de densité sèche à l'air de Bontemps (2005a) est bon et permet même de prendre en compte les tendances à long terme, sa précision est gâchée par l'estimation du coefficient de passage à l'infradensité avec seulement quelques valeurs extraites de la monographie du Hêtre (Tessier du Cros 1981). L'amélioration de ce point est sans doute réalisable facilement.

Enfin, le taux de carbone de la matière sèche est une source d'incertitudes qui pourrait sans doute être aisément levée par quelques mesures spécifiques, voire peut-être par une simple analyse de la bibliographie dans des domaines moins forestiers, et plus orientés sur l'anatomie du bois.

Si les améliorations ci-dessus sont envisageables dans un futur proche, une des incertitudes majeures que constituent les biomasses des systèmes racinaires ne pourrait être levée sans un programme de recherche très lourd.

3 – 2. Approfondissements

Pour terminer cette discussion, nous pouvons suggérer quelques voies qu'il serait sans doute très intéressant d'étudier afin de poursuivre l'analyse.

Dans un premier temps, les changements de productivité des peuplements mis en évidence depuis quelques années (Spiecker *et al.* 1996, Dhôte *et al.* 2000a, Bontemps *et al.* 2005b) interrogent sur l'évolution des stocks de carbone. Plusieurs études de Karjalainen (1996, 2002) sont menées en comparant le stockage de carbone sous différentes hypothèses climatiques, qui influent sur la croissance des peuplements. Dans notre cas, l'étude des changements de productivité passés est décrite par Bontemps (2005b) au moyen d'analyses de tiges, et le lien entre le stockage de carbone et les changements de productivité passés et possibles dans l'avenir serait intéressant à étudier pour les essences françaises.

D'autre part, si un couplage avec un modèle de carbone du sol plus performant pour l'évolution du carbone à long terme est possible, cela ouvrirait d'autres voies d'analyse. En particulier, le type d'éclaircies pratiquées ainsi que la gestion des rémanents pourraient prendre une importance considérable. Johnson et Curtis (2001) estiment par exemple avec une méta analyse que l'exportation de l'ensemble des compartiments des arbres éclaircis peut conduire à une perte de 6 % du carbone du sol, alors que si seul le bois commercial de la tige est exporté, et le reste laissé sur le terrain, le stock de carbone du sol pourrait augmenter de 18 %.

Pour répondre aux objectifs de la thèse sur l'impact de différentes stratégies sylvicoles sur les variations de stocks de carbone, la comptabilité de ceux-ci a été appréhendée avec des modèles performants. Cette partie du travail pourrait être déclinée en lien avec les données de l'Inventaire Forestier National afin de mettre en place des méthodes plus précises que celles qui existent actuellement (Dupouey *et al.* 1999, Pignard *et al.* 2000), basées essentiellement sur des valeurs moyennes forfaitaires, pour estimer les stocks de carbone de la ressource nationale.

Enfin, un travail primordial à effectuer serait l'intégration de ce type de chaînes de modèles à l'échelle du massif forestier. La présente étude se place à l'échelle de la parcelle, pour des peuplements théoriques. Une intégration de ces chaînes à des échelles plus larges permettrait de répondre à des questions précises et pratiques sur le stockage de carbone dans des conditions réelles. Cela pourrait également être fait sur des données du type de celles de l'Inventaire Forestier National.

Références bibliographiques

- Aber, J. D. et J. M. Melillo. 1982. Nitrogen immobilization in decaying hardwood leaf litter as a function of initial nitrogen and lignin content. *Canadian Journal of Botany* **60** (11):2263-2269.
- Aber, J. D., J. M. Melillo et C. A. McClaugherty. 1990. Predicting long-term patterns of mass loss, nitrogen dynamics, and soil organic matter formation from initial fine litter chemistry in temperate forest ecosystems. *Canadian Journal of Botany* **68** (10):2201-2208.
- ARBOCENTRE. 2005. L'utilisation du Pin en région Centre, Pin durable Volet 2. *Rapport interne*:39p.
- Arrouays, D. 2002. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France. *Rapport d'expertise INRA*:333p.
- Arrouays, D. et P. Pelissier. 1994. Changes in carbon storage in temperate humid loamy soils after forest clearing and continuous corn cropping in France. *Plant and Soil* **160** (2):215-223.
- Badeau, V. 1998. Caractérisation écologique du Réseau européen de suivi des dommages forestiers - Bilan des opérations de terrain et premiers résultats. *Les Cahiers du DSF* **5-1998**:211p.
- Badeau, V., M. Becker, D. Bert, J. L. Dupouey, F. Lebourgeois et J.-F. Picard. 1996. Long-term growth trends of trees : ten years of dendrochronological studies in France. in H. Spiecker, M. Mielikäinen, M. Köhl, et J. P. Skovsgaard, editors. *Growth trends in European forests*. Berlin-Heidelberg. 167-181.
- Bailly, A. et M. Bigot. 1997. Un modèle de croissance pour les plantations équiennes de Douglas. 549. in Informations-Foret, Afocel-ArmeF. Association Foret-Cellulose (AFOCEL), Paris France.
- Bartelink, H. H. 1998. A model of dry matter partitioning in trees. *Tree Physiology* **18** (2):91-101.
- Bateman, I. J. et A. A. Lovett. 2000. Estimating and valuing the carbon sequestered in softwood and hardwood trees, timber products and forest soils in Wales. *Journal of Environmental Management* **60** (4):301-323.
- Belingard, C., J. Vinson et S. Perret. 2002. Modélisation du Pin laricio. Validation - transfert. *Rapport de convention DERF/Cemagref*. 50p.
- Bénichou, P. et O. le Breton. 1987. Prise en compte de la topographie pour la cartographie de champs pluviométriques statistiques: la méthode Aurelhy. *Colloques de l'INRA* (No. 39):51-69.
- Berg, B., A. Albrektson, M. P. Berg, J. Cortina, M. B. Johansson, A. Gallardo, M. Madeira, J. Pausas, W. Kratz, R. Vallejo et C. McClaugherty. 1999. Amounts of litter fall in some pine forests in a European transect, in particular Scots pine. *Annals of Forest Science* **56** (8):625-639.

- Berg, B., M. B. Johansson, V. Meentemeyer et W. Kratz. 1998. Decomposition of tree root litter in a climatic transect of coniferous forests in Northern Europe: a synthesis. *Scandinavian Journal of Forest Research* **13** (4):402-412.
- Berg, B. et C. McLaugherty. 2002. Plant Litter. Decomposition, Humus formation, Carbon Sequestration. Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, Germany.
- Besnehard, J. 1998. La Forêt Puis de Carbone ? Exemple de l'internalisation d'un bien ou service non marchand. Rapport de DEA. Engref, Nancy. 88p. + annexes.
- Besnehard, J. et J. L. Peyron. 2000. La forêt, possible instrument économique et politique de lutte contre l'effet de serre. *Revue Forestière Française* **52** (Special):155-164.
- Bontemps, J.-D. 2002. Analyse de la croissance radiale dans des hêtraies régulières du Nord-Est de la France. Evolution de la vitesse de croissance au cours du XXe siècle. Rapport de DEA. Engref, Nancy. 23p. + Annexes.
- Bontemps, J.-D., J.-C. Herve, P. Gelhaye et F. Mothe. 2005a. La densité du bois de Hêtre est-elle affectée par une tendance à long terme ? Etude dans les hêtraies régulières du Nord Est français. *En préparation*.
- Bontemps, J.-D., P. Vallet, J.-C. Herve, D. Rittié, J.-L. Dupouey et J.-F. Dhôte. 2005b. Des hêtraies qui poussent de plus en plus vite : vers une forte diminution de leur âge d'exploitabilité ? *Revue Forestière Française* (Soumis).
- Börjesson, P. et L. Gustavsson. 2000. Greenhouse gas balances in building construction : wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives. *Energy Policy* **20**:575-588.
- Borken, W., Y. Xu et F. Beese. 2003. Conversion of hardwood forests to spruce and pine plantations strongly reduced soil methane sink in Germany. *Global Change Biology* **9** (6):956-966.
- Bosatta, E. et G. Ågren. 1997. Theoretical analyses of soil texture effects on organic matter dynamics. *Soil Biology & Biochemistry* **29** (11/12):1633-1638.
- Bouchon, J. 1974. Les tarifs de cubage, Engref, Nancy, France. 57p. + annexes.
- Bouchon, J. 1982. Tarifs de cubage à deux entrées pour le Hêtre (*Fagus sylvatica*) en France. *Revue Forestière Française* **34** (3):225-236.
- Bouchon, J., J.-M. Ottorini et J. Pardé. 1981. Contribution à une meilleure connaissance des potentialités ligneuses totales en France à partir des données de L'Inventaire Forestier National. 18p. + annexes.
- Brêthes, A. et E. Ulrich. 1997. RENECOFOR - Caractéristiques pédologiques des 102 peuplements du réseau. *Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques*:575p.
- Brouwer, R. 1962. Distribution of dry matter in the plant. *Netherlands Journal of Agricultural Science* **10**:362-376.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. in FAO Forestry Paper.

- Buchanan, A. H. et S. B. Levine. 1999. Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. *Environmental Science and Policy* **2**:427-437.
- Bucket, E., G. Le Moguédec, F. Mothe et G. Nepveu. 2005. Modélisation des bilans "environnement" et "produits" de sylvicultures contrastées. *Revue Forestière Française* (sous presse).
- Burke, I. C., C. M. Yonker, W. J. Parton, C. V. Cole, K. Flach et D. S. Schimel. 1989. Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in US grassland soils. *Soil Science Society of America Journal* **53** (3):800-805.
- Callesen, I., J. Liski, K. Raulund-Rasmussen, M. T. Olsson, L. Tau-Strand, L. Vesterdal et C. J. Westman. 2003. Soil carbon stores in Nordic well-drained forest soils - relationships with climate and texture class. *Global Change Biology* **9** (3):358-370.
- Cannell, M. 1995. Forests and the global carbon cycle in the past, present and future. Research Report (n°2) - European Forest Institute. 66p.
- Cannell, M. G. R. 2003. Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK. *Biomass and Bioenergy* **24** (2):97-116.
- Chen, H., M. E. Harmon, R. P. Griffiths et W. Hicks. 2000. Effects of temperature and moisture on carbon respired from decomposing woody roots. *Forest Ecology and Management* **138** (1/3):51-64.
- Chen, H., M. E. Harmon, J. Sexton et B. Fasth. 2002. Fine-root decomposition and N dynamics in coniferous forests of the Pacific Northwest, U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research* **32** (2):320-331.
- CITEPA. Juillet 1994. (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique). Estimation des émissions de gaz à effet de serre en France de 1990-1993.
- Coleman, K. et D. S. Jenkinson. 1996. RothC-26,3 - a model for the turnover of C in soil. *Evaluation of soil organic matter models using existing long-term databases* **38**:237-246.
- Coleman, K. et D. S. Jenkinson. 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26,3. *Geoderma* **81** (1-2):29-44.
- Cortez, J., J. M. Demard, P. Bottner et L. J. Monrozier. 1996. Decomposition of mediterranean leaf litters: a microcosm experiment investigating relationships between decomposition rates and litter quality. *Soil Biology & Biochemistry* **28** (4/5):443-452.
- Covington, W. W. 1981. Changes in forest floor organic matter and nutrient content following clear cutting in northern hardwoods. *Ecology* **62** (1):41-48.
- Cronan, C. S. 2003. Belowground biomass, production, and carbon cycling in mature Norway spruce, Maine, U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research* **33** (2):339-350.
- CTBA. 1994. Les résineux Français. *Plaquette réalisée avec le concours financier de l'ADEME et Formabois, avec la collaboration de la FNB.*
- de Champs, J. 1997. Le Douglas. Association Foret-Cellulose (AFOCEL), Paris France. 416 p.

- de Champs, J. et P. Demarcq. 1996. Sylviculture du douglas. *Bulletin Technique - Office National des Forêts* **31**:35-42.
- de Coligny, F., P. Ancelin, G. Cornu, B. Courbaud, P. Dreyfus, F. Goreaud, S. Gourlet-Fleury, C. Meredieu et L. Saint-Andre. 2003. CAPSIS: computer-aided projection for strategies in silviculture: advantages of a shared forest-modelling platform. *in* Modelling forest systems. Workshop on the interface between reality, modelling and the parameter estimation processes, Sesimbra, Portugal, 2-5 June 2002. 319-323.
- de Santo, A. V., F. A. Rutigliano, B. Berg, A. Fioretto, G. Puppi et A. Alfani. 2002. Fungal mycelium and decomposition of needle litter in three contrasting coniferous forests. *Acta Oecologica* **23** (4):247-259.
- Décourt, N. 1965. Le Pin sylvestre et le Pin laricio de Corse en Sologne. *Annales des Sciences Forestières* **22** (2):259-318.
- Décourt, N. 1967a. Le Douglas dans le Nord-Est du Massif Central. *Annales des Sciences Forestières* **24** (1):45-84.
- Décourt, N. 1967b. Table de production pour le Douglas dans le Nord-Est du Massif Central. *Revue Forestière Française* **8-9**:547-560.
- Décourt, N. 1973. Tables de production pour l'Epicéa commun et le Douglas dans l'Ouest du Massif Central. *Revue Forestière Française* **25** (2):99-104.
- Décourt, N. et C. Nys. 1976. Nutrition, croissance et production de l'Epicéa et du Douglas dans le Limousin. *Revue Forestière Française* **XXVIII** (3):193-201.
- Dewar, R. C. et M. G. R. Cannell. 1992. Carbon sequestration in the trees, products and soils of forest plantations: an analysis using UK examples. *Tree Physiology* **11** (1):49-71.
- Dhôte, J.-F. 1991. Modélisation de la croissance des peuplements réguliers de hêtre: dynamique des hiérarchies sociales et facteurs de production. *Annales des Sciences Forestières* **48** (4):389-416.
- Dhôte, J.-F. 1995. Définition de scénarios d'éclaircie pour le Hêtre et le Chêne. *Revue Forestière Française* **48** (Numéro spécial):106-110.
- Dhôte, J.-F. 1996. A model of even-aged beech stands productivity with process-based interpretations. *Annales des Sciences Forestières* **53** (1):1-20.
- Dhôte, J.-F. 1997. Effets des éclaircies sur le diamètre dominant dans des futaies régulières de Hêtre ou de Chêne sessile. *Revue Forestière Française* **49** (6):557-578.
- Dhôte, J.-F. et E. de Hercé. 1994. Un modèle hyperbolique pour l'ajustement de faisceaux de courbes hauteur-diamètre. *Canadian Journal of Forest Research* **24** (9):1782-1790.
- Dhôte, J.-F., J.-L. Dupouey et L. Berges. 2000a. Modifications a long terme, déjà constatées, de la productivité des forêts françaises. *Revue Forestière Française* **52** (Special):37-48.
- Dhôte, J.-F., E. Hatsch et D. Rittié. 2000b. Forme de la tige, tarifs de cubage et ventilation de la production en volume chez le Chêne sessile. *Annals of Forest Science* **57** (2):121-142.
- Dhôte, J.-F. et G. Le Moguédec. 2002. Présentation du modèle Fagacées. *Rapport interne*:31p.

- Drexhage, M., M. Chauviere, F. Colin et C. N. N. Nielsen. 1999. Development of structural root architecture and allometry of *Quercus petraea*. *Canadian Journal of Forest Research* **29** (5):600-608.
- Drexhage, M. et F. Colin. 2001. Estimating root system biomass from breast-height diameters. *Forestry (Oxford)* **74** (5):491-497.
- Duplat, P. et B. Roman-Amat. 1996. Sylviculture du hêtre. *Bulletin Technique - Office National des Forêts* **31**:29-33.
- Duplat, P. et M. Tran-Ha. 1997. Modélisation de la croissance en hauteur dominante du Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) en France. Variabilité inter-régionale et effet de la période récente (1959-1993). *Annales des Sciences Forestières* **54** (7):611-634.
- Dupouey, J. L. 2002. Détermination de facteurs d'expansion racines, branches et feuilles pour le calcul des stocks et flux de carbone dans les forêts françaises à partir d'une synthèse bibliographique. *Rapport interne*.
- Dupouey, J. L. et G. Pignard. 2001. Quelques problèmes posés par l'évaluation des stocks et flux de carbone forestiers au niveau national. *Revue Forestière Française* **53** (3/4):294-300.
- Dupouey, J. L., G. Pignard, V. Badeau, A. Thimonier, J. F. Dhote, G. Nepveu, L. Berges, L. Augusto, S. Belkacem et C. Nys. 1999. Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France* **85** (6):293-310.
- Dupouey, J. L., D. Sciama, W. Koerner, E. Dambrine et J. C. Rameau. 2002. La végétation des forêts anciennes. *Revue Forestière Française* **54** (6):521-532.
- Duvigneaud, P., P. Kestemont et P. Ambroes. 1969. Productivité primaire des forêts tempérées d'essences feuillues caducifoliées en Europe occidentale. Pages 259-270 dans P. Duvigneaud, editor. Productivité des écosystèmes forestiers. Actes du colloque de Bruxelles organisé par l'Unesco et le Programme biologique international (27-31 octobre 1969). Unesco, Paris, 1971.
- Edmonds, R. L. 1979. Decomposition and nutrient release in Douglas-fir needle litter in relation to stand development. *Canadian Journal of Forest Research* **9**:132-140.
- Edmonds, R. L. 1980. Litter decomposition and nutrient release in Douglas-fir, red alder [*Alnus rubra*], western hemlock, and Pacific silver fir *Abies amabilis* ecosystems in western Washington. *Canadian Journal of Forest Research* **10** (3):327-337.
- Edmonds, R. L. 1987. Decomposition rates and nutrient dynamics in small-diameter woody litter in four forest ecosystems in Washington, U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research* **17** (6):499-509.
- Epron, D., L. Farque, E. Lucot et P. M. Badot. 1999. Soil CO₂ efflux in a beech forest: dependence on soil temperature and soil water content. *Annals of Forest Science* **56** (3):221-226.
- Federer, C. A. 1984. Organic matter and nitrogen content of the forest floor in even-aged northern hardwoods. *Canadian Journal of Forest Research* **14** (6):763-767.
- Fioretto, A., A. Musacchio, G. Andolfi et A. V. d. Santo. 1998. Decomposition dynamics of litters of various pine species in a Corsican pine forest. *Soil Biology & Biochemistry* **30** (6):721-727.

- Flammarion, J.-P. 1986. Regroupement en lots par classes de diamètre. Laboratoire d'Economie Forestière, Engref, Nancy. *Rapport interne*.
- Froment, A., M. Tanghe, P. Duvigneaud, A. Galoux, S. Denaeyer - De Smet, G. Schnock, J. Grulois, F. Mommaerts - Billiet et J. P. Vanséveren. 1969. La chênaie mélangée calcicole de Virelles-Blaimont, en haute Belgique. Pages 635-666 dans P. Duvigneaud, editor. Productivité des écosystèmes forestiers. Actes du colloque de Bruxelles organisé par l'Unesco et le Programme biologique international (27-31 octobre 1969). Unesco, Paris, 1971.
- Galinski, W. 2005. Country decisions concerning forests in the Kyoto Protocol; options for inclusion of forests in a post 2012 climate agreement - Summary of two workshops in Graz, Austria. *Communication orale dans Management of forest ecosystems and its impacts on the GHG budget*, Savonlinna, Finlande, 26-28 août 2005
- Gaudinski, J. B., S. E. Trumbore, E. A. Davidson et S. Zheng. 2000. Soil carbon cycling in a temperate forest: radiocarbon-based estimates of residence times, sequestration rates and partitioning of fluxes. *Biogeochemistry* **51** (1):33-69.
- Gilbert, J. M., R. Chevalier et Y. Dumas. 1996. Autecologie du pin laricio de Corse dans le secteur ligérien. *Revue Forestiere Francaise* **48** (3):201-216.
- Girisha, G. K., L. M. Condron, P. W. Clinton et M. R. Davis. 2003. Decomposition and nutrient dynamics of green and freshly fallen radiata pine (*Pinus radiata*) needles. *Forest Ecology and Management* **179** (1/3):169-181.
- Goujon, P. 1981. Le Douglas. Première essence de reboisement. Institut pour le Développement forestier, Paris France. 85p.
- Grogan, P. et R. Matthews. 2001. Review of the potential for soil carbon sequestration under bioenergy crops in the UK. Institute of Water and Environment, Cranfield University. *Scientific Report*.
- Guilley, E. 2000. La densité du bois de Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.). Thèse de Doctorat. Engref, Nancy. 206p.
- Guilley, E., J. C. Herve, F. Huber et G. Nepveu. 1999. Modelling variability of within-ring density components in *Quercus petraea* Liebl. with mixed-effect models and simulating the influence of contrasting silvicultures on wood density. *Annals of Forest Science* **56** (6):449-458.
- Hammel, K. 2002. Bestandesparameter für die Modellierung des Wasser- und Stoffhaushalts in Waldern. *Forstliche Forschungsberichte Munchen* (No.186):117-123.
- Hättenschwiler, S. et D. Bretscher. 2001. Isopod effects on decomposition of litter produced under elevated CO₂, N deposition and different soil types. *Global Change Biology* **7** (5):565-579.
- Heath, L. S., R. A. Birdsey et D. W. Williams. 2002. Methodology for estimating soil carbon for the forest carbon budget model of the United States, 2001. *Environmental Pollution* **116** (3):373-380.
- Helmisaari, H. S. et L. Hallbäcken. 1998. Tree biomass belowground. in F. Anderson, F. Braekke, et L. Hallbäcken, editors. Nutrition and Growth of Norway Spruce Forests in a Nordic

- Climatic and Deposition Gradient, TemaNord 1998:566, Nordic Council of Ministers, Copenhagen. p80-90.
- Helmisaari, H. S., K. Makkonen, S. Kellomaki, E. Valtonen et E. Malkonen. 2002. Below- and above-ground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in eastern Finland. *Forest Ecology and Management* **165** (1/3):317-326.
- Homann, P. S., R. B. McKane et P. Sollins. 2000. Belowground processes in forest-ecosystem biogeochemical simulation models. *Forest Ecology and Management* **138** (1-3):3-18.
- Houllier, F., J. Leban et F. Colin. 1995. Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce. *Forest Ecology and Management* **74** (1/3):91-102.
- Huet, S. 2004. La hêtraie de plaine, puits ou source de carbone ? Cas du site atelier de la forêt de Fougères. Thèse de Doctorat. Université de Rennes I. 307p. + Annexes.
- Hynynen, J., A. Ahtikoski, J. Siitonen, R. Sievanen et J. Liski. 2005. Applying the MOTTI simulator to analyse the effects of alternative management schedules on timber and non-timber production. *Forest Ecology and Management* **207** (1/2):5-18.
- IPCC. 2000. Land use, land-use change, and forestry. Special report, Cambridge University Press. 377p.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: Synthesis Report - Summary for Policymakers. 37p.
- Jarret, P. 1996. Sylviculture du Chêne sessile. *Bulletin Technique - Office National des Forêts* **31**:21-28.
- Jenkinson, D. S. 1977. Studies on the decomposition of plant material in soil. V. The effects of plant cover and soil type on the loss of carbon from ¹⁴C labelled ryegrass decomposing under field conditions. *Journal of Soil Science* **28** (3):424-434.
- Jenkinson, D. S. 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* **329** (1255):361-368.
- Jobbagy, E. G. et R. B. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* **10** (2):423-436.
- Johnson, D. W. et P. S. Curtis. 2001. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management* **140** (2/3):227-238.
- Karjalainen, T. 1996. Dynamics and potentials of carbon sequestration in managed stands and wood products in Finland under changing climatic conditions. *Forest Ecology and Management* **80** (1/3):113-132.
- Karjalainen, T., S. Kellomaki et A. Pussinen. 1994. Role of wood-based products in absorbing atmospheric carbon. *Silva Fennica* **28** (2):67-80.
- Karjalainen, T., A. Pussinen, J. Liski, G. J. Nabuurs, M. Erhard, T. Eggers, M. Sonntag et G. M. J. Mohren. 2002. An approach towards an estimate of the impact of forest management and climate change on the European forest sector carbon budget: Germany as a case study. *Forest Ecology and Management* **162** (1):87-103.

- Keeling, C. D. et T. P. Whorf. 2005. Atmospheric CO₂ concentrations (ppmv) derived from in situ air samples collected at Mauna Loa Observatory, Hawaii - Disponible à l'adresse Internet <http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/trends/co2/maunaloa.co2>.
- Kelly, R. H., W. J. Parton, G. J. Crocker, P. R. Grace, J. Klir, M. Körschens, P. R. Poulton et D. D. Richter. 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the Century model. *Geoderma* **81**:75-90.
- Kirschbaum, M. U. F. 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic storage. *Soil Biology & Biochemistry* **27** (6):753-760.
- Kodrik, M. 2002. Belowground investigation of a sub-mountain beech forest at the Ecological Experimental Station in Central Slovakia. *Ekologia (Bratislava)* **21** (2):176-180.
- Kodrik, M. et M. Barna. 2002. Tree biomass of a beech stand treated by regeneration cutting. *Ekologia (Bratislava)* **21** (2):117-123.
- Koerner, W., B. Cinotti, J. H. Jussy et M. Benoit. 2000. Evolution des surfaces boisées en France depuis le début du XIX^e siècle: identification et localisation des boisements des territoires agricoles abandonnés. *Revue Forestière Française* **52** (3):249-269.
- Koerner, W., E. Dambrine, J. L. Dupouey et M. Benoit. 1999. delta 15N of forest soil and understorey vegetation reflect the former agricultural land use. *Oecologia* **121** (3):421-425.
- Kohlmaier, G. H., M. Weber et R. A. Houghton. 1998. Carbon dioxide mitigation in forestry and wood industry. Springer-Verlag, Berlin Germany. xxix + 375p.
- Koopmans, C. J., A. Tietema et J. M. Verstraten. 1998. Effects of reduced N deposition on litter decomposition and N cycling in two N saturated forests in the Netherlands. *Soil Biology & Biochemistry* **30** (2):141-151.
- Köstler, J. N., E. Brückner et E. Bibelriether. 1968. Die Wurzeln des Waldbäume, Verlag Paul Parey, Hamburg, Allemagne. 284p.
- Kozak, I. et M. Holubets. 2001. Biomass production and productivity in oak forests of the Eastern Carpathians in relationship with stands age. *Ekologia (Bratislava)* **20** (3):301-309.
- Laiho, R. et L. Finer. 1996. Changes in root biomass after water-level drawdown on pine mires in southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* **11** (3):251-260.
- Le Dantec, V. 2000. Modélisation des échanges carbonés et hydriques dans un écosystème forestier : un modèle couplé sol-plante. Thèse de Doctorat. Université Paris XI, Orsay. 137p. + Annexes.
- Le Goff, N. et J.-M. Ottorini. 2001. Root biomass and biomass increment in a beech (*Fagus sylvatica* L.) stand in North-East France. *Annals of Forest Science* **58**:1-13.
- Le Moguédec, G. 2002. Using a chain of models to optimize the management of a forest resource: what's about the precision of the results ? Case study on carbon sequestration in a Sessile oak stand and related wood products. in Fourth Workshop IUFRO S5.01.04, Harrison Hot Springs, British Columbia, Canada - September 8-15, 2002. p632-643.

- Leban, J.-M., F. Grandemange, S. Matz, R. Daquitaine, F. Mothe, L. Saint-André et P. Riou Nivert. 2001. La qualité du bois de Pin laricio. *Forêt-Entreprise* **137**:32-37.
- Lebourgeois, F. 1995. Etude dendroécologique et écophysiological du Pin laricio de Corse [*Pinus nigra* Arnold ssp. *laricio* Poiret var. *corsicana*] en région Pays de la Loire. Thèse de doctorat. Université Paris XI Orsay. 209p. + Annexes.
- Lehtonen, A., R. Makipaa, J. Heikkinen, R. Sievanen et J. Liski. 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management* **188** (1-3):211-224.
- Lindner, M. 1998. Implementing carbon mitigation measures in the forestry sector - a review. in G. H. Kohlmaier, M. Weber, et R. A. Houghton, editors. Carbon dioxide mitigation in forestry and wood industry: papers based on an international workshop. Springer-Verlag, Berlin Germany. 167-184.
- Liski, J., T. Palosuo, M. Peltoniemi et R. Sievanen. 2005. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling* (sous presse).
- Liski, J., D. Perruchoud et T. Karjalainen. 2002. Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. *Forest Ecology and Management* **169** (1/2):159-175.
- Liski, J., A. Pussinen, K. Pingoud, R. Makipaa et T. Karjalainen. 2001. Which rotation length is favourable to carbon sequestration? *Canadian Journal of Forest Research* **31** (11):2004-2013.
- Loustau, D., (éd.). 2004. Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. j. Rapport Final Projet GICC 2001 "Gestion des impacts du changement climatique" et convention Gip ECOFOR n°3/2001, Inra, Bordeaux-Pierroton (France). 137p.
- Löwe, H., G. Seufert et F. Raes. 2000. Comparison of methods used within Member States for estimating CO₂ emissions and sinks according to UNFCCC and EU Monitoring Mechanism: forest and other wooded land. *Biotechnologie, Agronomie, Societe et Environnement* **4** (4):315-319.
- Lundqvist, B. 1957. On the height growth in cultivated stands of pines and spruce in Northern Sweden. *Meddelelser fra Skogforsk* **47** (2).
- Malhi, Y., D. D. Baldocchi et P. G. Jarvis. 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment* **22** (6):715-740.
- Marland, E. et G. Marland. 2003. The treatment of long-lived, carbon-containing products in inventories of carbon dioxide emissions to the atmosphere. *Environmental Science and Policy* **6**:139-152.
- Melillo, J. M., J. D. Aber et J. F. Muratore. 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology* **63** (3):621-626.
- Melillo, J. M., P. A. Steudler, J. D. Aber, K. Newkirk, H. Lux, F. P. Bowles, C. Catricala, A. Magill, T. Ahrens et S. Morrisseau. 2002. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science (Washington)* **298** (5601):2173-2176.

- Melin, N. et P. Riou-Nivert. 1985. La qualité du douglas dépend-elle de la sylviculture ? *Forêt-Entreprise* (No. 32):18-24.
- Meredieu, C. 1998. Croissance et branchaison du Pin laricio (*Pinus nigra* Arnold ssp. *laricio* (Poiret) Maire): Élaboration et évaluation d'un système de modèles pour la prévision de caractéristiques des arbres et du bois. Thèse de Doctorat. Univ. Cl. Bernard Lyon I. 250p. + annexes.
- Mitchell, K. J. 1975. Dynamics and simulated yield of Douglas-Fir. *in* Forest Science Monographs. 39p.
- Möller, C. M., D. Müller et J. Nielsen. 1954. Graphic presentation of dry matter production of European beech. *Det Forstlige Forsøgsvæsen I Danmark* **21** (3):327-335.
- Moore, T. R., J. A. Trofymow, B. Taylor, C. Prescott, C. Camire, L. Duschene, J. Fyles, L. Kozak, M. Kranabetter, I. Morrison, M. Siltanen, S. Smith, B. Titus, S. Visser, R. Wein et S. Zoltai. 1999. Litter decomposition rates in Canadian forests. *Global Change Biology* **5** (1):75-82.
- Mortier, F. 1995. Le CO2 et la Forêt. *Bulletin Technique - Office National des Forêts* **29**:160p.
- Nepveu, G. et J.-F. Dhôte. 1998. Sylviculture et qualité du bois de Chêne sessile. INRA, Champenoux, France. *Rapport Final de la Convention INRA-ONF 1992-1996 "Sylviculture et Qualité du Bois de Chêne"*. 68p.
- Normandin, D. 1990. Le Chêne Français et ses produits dérivés. Marché intérieur et concurrence internationale. *Revue Forestière Française* **42** (2):110-118.
- Nys, C. 2001. Gestion des impacts du changement climatique - Programme GICC 1999. *Compte rendu final 1999-2001*.
- Ottorini, J.-M. 1994. Silvicultural control and non destructive assessment of timber quality in plantation grown spruces and Douglas-firs. *EEC Project No. MA2B-CT91-0024 (TSTS), Team Number 2, Task Number 1, Subtask 1.1*.
- Ottorini, J.-M. 1995. Simulation et sylviculture du Douglas. *Revue Forestière Française* **48** (Numéro spécial):97-105.
- Ottorini, J.-M., C. W. Swanston, J. Ranger et Q. Ponette. 2002. Modélisation et intégration logicielle : croissance, branchaison, qualité des bois. Aide à la décision pour la sylviculture et l'utilisation du bois des essences forestières françaises. *Convention DERF/INRA n° 61.45.47/01 - Code INRA 3816/B*. 18p.
- Paquet, P. et G. Deroubaix. 2003. Extension de l'éligibilité de la séquestration forestière du carbone à l'ensemble des stocks de la filière bois. Coordination CTBA. Rapport à l'ADEME pour le Programme GICC, 148p.
- Pardé, J. 1977. Biomasses forestières et utilisation totale des arbres. *Revue Forestière Française* **29** (5):333-342.
- Pardé, J. 1980. Forest Biomass. *Forestry Abstracts* **41** (8):343-362.
- Parton, W. J., D. S. Schimel, C. V. Cole et D. S. Ojima. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal* **51** (5):1173-1179.

- Parton, W. J., D. S. Schimel, D. S. Ojima et C. V. Cole. 1994. A general model for soil organic matter dynamics: sensitivity to litter chemistry, texture and management. *in* Quantitative modeling of soil forming processes: proceedings of a symposium sponsored by Divisions S-5 and S-9 of the Soil Science Society of America in Minneapolis, Minnesota, USA, 2 Nov. 1992. Soil Science Society of America Inc., Madison USA. 147-167.
- Patenaude, G. L., B. D. J. Briggs, R. Milne, C. S. Rowland, T. P. Dawson et S. N. Pryor. 2003. The carbon pool in a British semi-natural woodland. *Forestry (Oxford)* **76** (1):109-119.
- Paul, K. I., P. J. Polglase et G. P. Richards. 2003. Predicted change in soil carbon following afforestation or reforestation, and analysis of controlling factors by linking a C accounting model (CAMFor) to models of forest growth (3PG), litter decomposition (GENDEC) and soil C turnover (RothC). *Forest Ecology and Management* **177** (1/3):485-501.
- Pellinen, P. 1986. Biomasseuntersuchungen im Kalkbuchenwald. Thèse de doctorat. Forstwissenschaftlicher Fachbereich, Universität, Göttingen, Germany. 134p.
- Peltoniemi, M., R. Makipaa, J. Liski et P. Tamminen. 2004. Changes in soil carbon with stand age - an evaluation of a modelling method with empirical data. *Global Change Biology* **10** (12):2078-2091.
- Pignard, G. 2000. Evolution récente des forêts françaises : surface, volume sur pied, productivité. *Revue Forestière Française N° Spécial 2000*:27-36.
- Pignard, G., J. L. Dupouey, D. Arrouays et D. Loustau. 2000. Carbon stocks estimates for French forests. *Biotechnologie, Agronomie, Societe et Environnement* **4** (4):285-289.
- Pingoud, K., A. L. Perälä et A. Pussinen. 2001. Carbon dynamics in wood products. *Mitigation and adaptation strategies for global change* **6**:91-111.
- Ponette, Q., E. Ulrich, A. Brêthes, M. Bonneau et M. Lanier. 1997. RENECOFOR - Chimie des sols dans les 102 peuplements du réseau. *Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques*:427p.
- Post, W. M., W. R. Emanuel, P. J. Zinke et A. G. Stangenberger. 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature, UK* **298** (5870):156-159.
- Post, W. M., R. C. Izaurralde, L. K. Mann et N. Bliss. 2001. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. *Climatic Change* **51** (1):73-99.
- Pouderoux, S., C. Deleuze et J.-F. Dhôte. 2001. Analyse du rendement des houppiers dans un essai d'éclaircie de hêtre grâce à un modèle à base écophysologique. *Annals of Forest Science* **58** (3):261-275.
- Prescott, C. E. et C. M. Preston. 1994. Nitrogen mineralization and decomposition in forest floors in adjacent plantations of western red cedar, western hemlock, and Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* **24** (12):2424-2431.
- Prieur, A. 2004. Les ressources forestières : produits du bois, usages énergétiques, capture et stockage de carbone. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I. 183p.

- Ranger, J., F. Gerard, M. Lindemann, D. Gelhaye et L. Gelhaye. 2003. Dynamics of litterfall in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) stands in the Beaujolais mounts (France). *Annals of Forest Science* **60** (6):475-488.
- Reineke, L. H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research* **46** (7):627-638.
- Reynolds, J. F. et J. H. M. Thornley. 1982. A root-shoot partitioning model. *Annals of Botany* **49**:585-597.
- Richter, K. 1998. 3.3. Life cycle assessment of wood products. in G. H. Kohlmaier, M. Weber, et R. A. Houghton, editors. Carbon dioxide mitigation in forestry and wood industry. Springer-Verlag, Berlin Germany. 219-248.
- Riou Nivert, P. 1996. Sylviculture du pin laricio en reboisement. *Bulletin Technique - Office National des Forêts* **31**:53-58.
- Riou Nivert, P., J.-M. Leban, P. Dreyfus et C. Meredieu. 1999. Meilleure adaptation de la production de bois de Pin laricio à la demande industrielle. *AGRIDEM, Convention n°94.G.0207. Rapport final*.
- Riou Nivert, P., C. Meredieu, P. Dreyfus, J.-M. Leban, F. Grandemange, S. Matz, R. Daquitaine, F. Mothe, L. Saint-André et Y. Caraglio. 2001. Dossier: le pin laricio, du plant à la planche. *Forêt-Entreprise* (No. 137):17-48.
- Robert, M. et B. Saugier. 2003. Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. *Comptes Rendus Géoscience* **335** (6-7):577-595.
- Rodriguez-Murillo, J. C. 2001. Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain. *Biology and Fertility of Soils* **33** (1):53-61.
- Saporta, G. 1990. Probabilités, analyse des données et statistique. Technip, Paris. 493p.
- Sariyildiz, T. et J. M. Anderson. 2003. Decomposition of sun and shade leaves from three deciduous tree species, as affected by their chemical composition. *Biology and Fertility of Soils* **37** (3):137-146.
- Schroeder, P., S. Brown, J. Mo, R. Birdsey et C. Cieszewski. 1997. Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the United States using inventory data. *Forest Science* **43** (3):424-434.
- Schuur, E. A. G., O. A. Chadwick et P. A. Matson. 2001. Carbon cycling and soil carbon storage in mesic to wet Hawaiian montane forests. *Ecology* **82** (11):3182-3196.
- Selmani, Y. 1992. Analyse des flux physiques de bois à l'intérieur de la filière bois. Thèse de doctorat. Engref, Nancy. 241p.
- Seynave, I., J.-C. Gégout, J.-C. Hervé et J.-F. Dhôte. 2005a. Facteurs écologiques et production du hêtre en France. *Forêt-Entreprise* (soumis).
- Seynave, I., J.-C. Gégout, J.-C. Hervé, J.-F. Dhôte, J. Drapier et E. Bruno. 2005b. *Picea abies* site index prediction by environmental factors and understorey vegetation: a two-scale approach based on survey databases. *Canadian Journal of Forest Research* (sous presse).

- Smith, J. E., L. S. Heath et P. B. Woodbury. 2004. How to estimate forest carbon for large areas from inventory data. *Journal of Forestry* **102** (5):25-31.
- Smith, P., J. U. Smith, D. S. Powlson, W. B. McGill, J. R. M. Arah, O. G. Chertov, K. Coleman, U. Franko, S. Frolking, D. S. Jenkinson, H. E. Jensen, R. H. Kelly, H. Klein-Gunnewiek, A. S. Komarov, C. Li, J. A. E. Molina, T. Mueller, W. J. Parton, J. Thornley et W. A.P. 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma* **81** (1-2):153-225.
- Sozanska, M., P. Smith, R. Milne et T. Brown. 2002. Chapter 5 - Linking Soil and Vegetation Carbon in Dynamic Models. *UK Emissions by Sources and Removals by Sinks due to Land Use, Land Use Change and Forestry Activities*. 127 - 137.
- Spiecker, H., M. Mielikäinen et M. Köhl. 1996. Discussion. in H. Spiecker, M. Mielikäinen, M. Köhl, et J. P. Skovsgaard, editors. Growth trends in European forests. Berlin-Heidelberg. 167-181.
- S-Plus. 2000. Professional Release 3, 1988-2000 MathSoft Inc.
- Sun, O. J., J. Campbell, B. E. Law et V. Wolf. 2004. Dynamics of carbon stocks in soils and detritus across chronosequences of different forest types in the Pacific Northwest, USA. *Global Change Biology* **10** (9):1470-1481.
- Taylor, B. R., D. Parkinson et W. F. J. Parsons. 1989. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: a microcosm test. *Ecology* **70** (1):97-104.
- Tessier du Cros, E. 1981. Le Hêtre. INRA, Paris France. 613p.
- Thies, W. G. et P. G. Cunningham. 1996. Estimating large-root biomass from stump and breast-height diameters for Douglas-fir in western Oregon. *Canadian Journal of Forest Research* **26** (2):237-243.
- Thomas, F. M. 2000. Vertical rooting patterns of mature Quercus trees growing on different soil types in northern Germany. *Plant Ecology* **147** (1):95-103.
- Thomas, K. D. et C. E. Prescott. 2000. Nitrogen availability in forest floors of three tree species on the same site: the role of litter quality. *Canadian Journal of Forest Research* **30** (11):1698-1706.
- Thompson, D. A. et R. W. Matthews. 1989. CO₂ in trees and timber lowers greenhouse effect. *Forestry and British Timber*:19-24.
- Townsend, A. R., P. M. Vitousek, D. J. Desmarais et A. Tharpe. 1997. Soil carbon pool structure and temperature sensitivity inferred using CO₂ and ¹³CO₂ incubation fluxes from five Hawaiian soils. *Biogeochemistry* **38** (1):1-17.
- Trettin, C. C., B. Song, M. F. Jurgensen et C. Li. 2001. Existing Soil Carbon Models Do Not Apply to Forested Wetlands. *USDA Forest Service*:10p.
- Trincado, G. et K. v. Gadow. 1996. Zur Sortimentschätzung stehender Laubbaume. *Centralblatt für das Gesamte Forstwesen* **113** (1):27-38.
- Ulrich, E. 1995. Le réseau RENCOFOR : objectifs et réalisation. *Revue Forestière Française* **47** (2):107-124.

- UNFCCC. 1997. Le Protocole de Kyoto. Disponible sur le site <http://unfccc.int/>. 24p.
- Vallet, P. 2002. Construction de tarifs de cubage pour le volume aérien de 6 essences feuillues et résineuses. Rapport de DEA. Engref, Nancy. 19p. +Annexes.
- Vallet, P., J.-F. Dhôte, G. Le Moguédec, M. Ravart et G. Pignard. 2005. Development of total aboveground volume tables for 7 important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management* (Soumis).
- Van Camp, N., I. Vande Walle, J. Mertens, S. De Neve, R. Samson, N. Lust, R. Lemeur, P. Boeckx, P. Lootens, D. Beheydt, I. Mestdagh, S. Sleutel, H. Verbeeck, O. Van Cleemput, G. Hofman et L. Carlier. 2004. Inventory-based carbon stock of Flemish forests: a comparison of European biomass expansion factors. *Annals of Forest Science* **61**:677-682.
- Vande Walle, I., S. Mussche, R. Samson, N. Lust et R. Lemeur. 2001. The above- and belowground carbon pools of two mixed deciduous forest stands located in East-Flanders (Belgium). *Annals of Forest Science* **58** (5):507-517.
- Vanmechelen, L., R. Groenemans et E. Van Ranst. 1997. Forest soil condition in Europe. Result of a large-scale soil survey. EC-UN/ECE, Ministry of the Flemish Community, Brussels, Geneva. 198p. + Annexes.
- Vanninen, P. et A. Makela. 1999. Fine root biomass of Scots pine stands differing in age and soil fertility in southern Finland. *Tree Physiology* **19** (12):823-830.
- Yanai, R. D., W. S. Currie et C. L. Goodale. 2003. Soil carbon dynamics after forest harvest: an ecosystem paradigm reconsidered. *Ecosystems* **6** (3):197-212.
- Zeide, B. 1993. Analysis of growth equations. *Forest Science* **39** (3):594-615.
- Zinke, P. J. et A. G. Stangenberger. 2000. Elemental storage of forest soil from local to global scales. *Forest Ecology and Management* **138** (1/3):159-165.

ANNEXE I – Développement informatique

Cette annexe est dédiée à la description de la programmation du modèle « Fagacées » de Jean-François DHÔTE (Dhôte 1991, Dhôte et de Hercé 1994, Dhôte 1996, Dhôte et Le Moguédec 2002), et des implémentations des différents modèles utilisés au cours de la thèse.

Architecture générale du module « Fagacées »

La nouvelle version de « Fagacées » est programmée dans l'environnement CAPSIS (de Coligny *et al.* 2003) développé en Java. CAPSIS (Croissance d'Arbres en Peuplement avec Simulation d'Itinéraires Sylvicoles) est un outil informatique permettant à l'utilisateur de simuler et de comparer la croissance d'arbres dans des peuplements forestiers. Ses objectifs sont aussi bien la gestion forestière que l'enseignement et la recherche. Le noyau de CAPSIS est une plateforme libre sur laquelle de nombreux modules se greffent, concernant des problématiques différentes. Le développement simultané de tous ces modules permet d'avancer conjointement avec les collègues chercheurs en foresterie et par là même de profiter des avancées de chacun.

« Fagacées », à l'origine un modèle implémenté en Pascal sur un système Macintosh, a été migré au cours de la thèse sous l'environnement CAPSIS pour devenir l'un des modules.

La description scientifique du modèle (Dhôte et Le Moguédec 2002) n'est pas l'objet de cette partie. Seul l'aspect informatique est schématiquement développé ici.

1. Description architecturale du corps principal du module

Tous les éléments concernant le module Fagacées figurent le répertoire `\Capsis4`. Le corps principal du module est développé dans le répertoire `\Capsis4\bin\fagacees`. Il est divisé en quatre packages, suivant la forme standard des modules de Capsis.

- `\Capsis4\bin\fagacees\gui` :

Le package GUI (Graphical User Interface) contient 4 classes de création de boîtes de dialogue et une classe relais. La classe relais (`FgRelay.java`) de ce répertoire est le pilote qui permet d'utiliser Fagacées en mode interactif. Il est à noter que ce package contient exclusivement des instructions relatives à l'interface interactive entre le logiciel et l'utilisateur. Aucun calcul n'y est effectué.

Les classes de dialogue sont :

- `FgDInitStand.java` : Première boîte de dialogue apparaissant lors du chargement de Fagacées. Elle propose de créer un peuplement virtuel ou de charger un inventaire.
- `FgDCreate.java` : Boîte de dialogue dans laquelle l'utilisateur choisit les caractéristiques liées au peuplement qu'il veut créer (essence, fertilité...).

- `FgDGrowthParameters.java` : Boite de dialogue ouverte lorsque l'utilisateur choisi de faire évoluer le peuplement. Elle propose soit d'atteindre un age donné, soit de faire un scénario d'éclaircies automatiques.
- `FgDDefineScenario.java` : Boite de dialogue permettant à l'utilisateur de définir les paramètres du scénario sylvicole automatique.

- `\Capsis4\bin\fagacees\script` :

Ce package est le pendant du précédent pour le mode console. C'est-à-dire qu'il réunit les classes permettant de simuler des scénarios sylvicoles sans passer par l'interface interactive de Capsis. Ce mode peut être extrêmement pratique pour effectuer un grand nombre de simulations au moyen de boucles (voir également le package `simulation`). Il contient, outre un relais, les deux classes suivantes :

- `FgInitialParameters.java` : Objet héritant de `FgSettings.java`. Il contient les paramètres initiaux du peuplement. Ce sont par défaut les paramètres de `FgSettings.java`, mais peuvent être changés dans le script.
- `FgEvolutionParameter.java` : Cette classe permet de définir la manière dont on fait évoluer un peuplement. Elle contient deux constructeurs : le premier fait simplement atteindre l'âge désiré au peuplement, sans intervention sylvicole. Le second permet de faire évoluer le peuplement jusqu'à l'âge voulu suivant un scénario sylvicole déclenchant automatiquement les éclaircies.

- `\Capsis4\bin\fagacees\model` :

Les classes de ce package sont celles où le peuplement est créé ou évolue. Il serait fastidieux de décrire l'ensemble de ses classes, et il est possible pour plus de renseignements de se référer à la documentation en ligne disponible avec le code. Néanmoins, les classes majeures sont décrites ci-dessous :

- `FgTree.java` : Cet objet définit les éléments d'un arbre dans Fagacées. Il sera instancié autant de fois qu'il y a d'arbres dans le peuplement.
- `FgStand.java` : Le «`FgStand`» contient la description du peuplement dans lequel sont situés les arbres. On trouve également dans cette classe les méthodes permettant de calculer l'accroissement individuel des arbres et les variables dendrométriques du peuplement (hauteur dominante, diamètre dominant, surface terrière...)
- `FgSettings.java` : Cette classe recèle les paramètres fixes ou non du modèle. On y trouve à la fois les données entrées par l'utilisateur lors de la création du peuplement (essence, fertilité...) et les paramètres des divers modèles utilisés dans Fagacées. Pour faciliter les futures modifications du code, aucune valeur de paramètre ne doit se trouver dans une autre classe. Cette règle assure de plus que lorsque le paramétrage d'un modèle est modifié, l'ensemble des classes l'utilisant en bénéficient.

- `FgModel.java`: Il s'agit de la classe gérant le déroulement de l'évolution du peuplement. Y figure en particulier la méthode `processEvolution()` – appelée par la classe `FgRelay` – qui décrit les étapes nécessaires à l'accomplissement de l'évolution du peuplement pendant un pas de temps.

- `\Capsis4\bin\fagacees\simulation`:

Ce petit package contient pour seule classe `Script01.java` qui est un exemple de simulation en mode console. L'utilisation des scripts est réservée à des « utilisateurs avancés », qui trouveront dans cet exemple tout le nécessaire pour créer des scripts selon leurs propres besoins. Le lancement du script se fait par la ligne de commande suivante dans la console :

sous Windows : `capsis -pscript fagacees.simulation.Script01`

sous Linux : `./capsis.sh -pscript fagacees.simulation.Script01`

2. Classes et fichiers relatifs au module ne figurant pas dans le répertoire principal

Comme nous l'avons précisé dans le paragraphe précédent, un répertoire principal regroupe la grande majorité des classes de fagacées. Cependant, d'autres classes ont été développées au cours de la thèse et sont situées dans les emplacements suivants :

- `\Capsis4\bin\capsis\extension\ioformat\FgInventory.java`
:

Classe de chargement d'un fichier d'inventaire pour simuler la croissance d'un peuplement réel.

- `\Capsis4\data\Fagacees\Belleme.test` :
Fichier d'inventaire type, il comporte tous les champs obligatoires.

- `\Capsis4\bin\capsis\extension\dataextractor\` :

Répertoire générique contenant tous les visualisateurs du peuplement. Certains ont été développés pour Fagacées, mais la plupart sont génériques et ont été implémentés par d'autres modélisateurs.

- `\Capsis4\bin\capsis\extension\objectviewer\` :

Répertoire contenant les visualisateurs d'objets, en particulier le tracer du profil de tige dans le cas du Chêne sessile (`FgTreeTaper.java`). Il s'agit également d'un répertoire générique.

ANNEXE II – La loi de Weibull

Cette annexe présente le développement des calculs des moments de la loi de Weibull.

On dit qu'une variable aléatoire X suit une loi de Weibull à trois paramètres si $\frac{X^\beta - \gamma}{\alpha}$ suit une loi exponentielle (Saporta 1990). La forme standard de la fonction est obtenue pour $\alpha = 1$ et $\gamma = 0$.

Supposons alors que la variable aléatoire X suive une loi de Weibull. Posons $Y = X^\beta$. On sait alors que Y suit une loi exponentielle de paramètre λ .

Fonction de répartition :

La fonction de répartition de la loi exponentielle est $f(y) = 1 - e^{-\lambda y}$.

Si on appelle $P(Y \leq y)$ la probabilité qu'une réalisation de Y soit inférieure ou égale à y , on a alors :

$$P(Y \leq y) = 1 - e^{-\lambda y} = 1 - e^{-\lambda x^\beta}$$

$$\text{or} \quad P(Y \leq y) = P\left(Y^{\frac{1}{\beta}} \leq y^{\frac{1}{\beta}}\right) = P(X \leq x)$$

$$\text{donc} \quad P(X \leq x) = 1 - e^{-\lambda x^\beta}$$

La fonction de répartition de la loi de Weibull est donc

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x^\beta}$$

Densité de la fonction :

La densité de la fonction est la dérivée de la fonction de répartition

$$f(x) = \lambda \beta x^{\beta-1} e^{-\lambda x^\beta}$$

Espérance de la loi de Weibull :

$$E(X) = \int_0^{+\infty} x f(x) dx = \int_0^{+\infty} \lambda \beta x^\beta e^{-\lambda x^\beta} dx$$

Posons le changement de variables $y = \lambda x^\beta$, alors $dy = \lambda \beta x^{\beta-1} dx$, donc

$$E(X) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{\lambda^{\frac{1}{\beta}}} y^{\frac{1}{\beta}} e^{-y} dy$$

$$E(X) = \frac{1}{\lambda^{\frac{1}{\beta}}} \int_0^{+\infty} y^{(1+\frac{1}{\beta})-1} e^{-y} dy$$

La variance de la loi de Weibull est donc

$$E(X) = \frac{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})}{\lambda^{\frac{1}{\beta}}}$$

où Γ est la fonction gamma.

Variance de la loi de Weibull :

On calcule la variance avec la formule : $V(X) = E(X^2) - E(X)^2$

$$E(X^2) = \int_0^{+\infty} x^2 f(x) dx = \int_0^{+\infty} \lambda \beta x^{\beta+1} e^{-\lambda x^\beta} dx$$

Posons le changement de variables $y = \lambda x^\beta$, alors $dy = \lambda \beta x^{\beta-1} dx$, donc

$$E(X^2) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{\lambda^{\frac{2}{\beta}}} y^{\frac{2}{\beta}} e^{-y} dy$$

$$E(X^2) = \frac{1}{\lambda^{\frac{2}{\beta}}} \int_0^{+\infty} y^{(1+\frac{2}{\beta})-1} e^{-y} dy$$

$$E(X^2) = \frac{\Gamma(1 + \frac{2}{\beta})}{\lambda^{\frac{2}{\beta}}}$$

Donc on obtient

$$V(X) = \frac{\Gamma(1 + \frac{2}{\beta}) - \left[\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})\right]^2}{\lambda^{\frac{2}{\beta}}}$$

où Γ est la fonction gamma.

Calcul du paramètre λ :

Supposons que l'on connaisse l'espérance de vie : posons $E(X) = m$

On a alors

$$m = \frac{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})}{\lambda^{\frac{1}{\beta}}}$$

$$\text{donc } \lambda = \left(\frac{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})}{m} \right)^\beta$$

Cas particulier : $\beta = 2$

Dans ce cas particulier, on obtient le taux de survie suivant :

$$T(x) = e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{x}{m} \right)^2}$$

**Impact de différentes stratégies sylvicoles
sur la fonction « puits de carbone » des peuplements forestiers.
Modélisation et simulation à l'échelle de la parcelle.**

La capitalisation sur pied et la substitution d'essences sont deux stratégies sylvicoles analysées dans cette thèse, chacune pressentie pour être favorable au stockage du carbone, enjeu majeur de ce XXI^{ème} pour la lutte contre le réchauffement climatique. La première correspond à un ralentissement des récoltes, qui devrait générer un puits de carbone additionnel par l'augmentation des stocks moyens de biomasse sur pied. La substitution d'essences à croissance lente comme le Chêne sessile ou le Hêtre par des essences résineuses à croissance rapide comme le Pin laricio ou le Douglas pourrait entraîner une absorption plus rapide du CO₂. L'impact sur le carbone de ces deux stratégies est d'autant plus intéressant à étudier que les gestionnaires forestiers les pratiquent déjà.

La construction d'une chaîne de modèles prenant en compte l'ensemble des compartiments dans lesquels le carbone est impliqué, à savoir la biomasse forestière, le sol, mais aussi les produits forestiers issus de l'exploitation, permet d'effectuer des simulations donnant des résultats quantitatifs sur ces pratiques.

Nous montrons qu'une capitalisation sur pied engendrerait un puits de carbone additionnel dépendant de l'état initial des peuplements, de la fertilité et de la nouvelle sylviculture pratiquée. Il pourrait s'élever jusqu'à 142 tC/ha après obtention du régime permanent dans le cas le plus favorable. La substitution de feuillus à croissance lente par des résineux à croissance rapide serait également un puits de carbone important (jusqu'à 2 tC/ha/an) pendant plusieurs décennies, mais s'avérerait d'un stock de carbone moyen inférieur sur le long terme.

Mots-clefs : Stockage de carbone, biomasse, sols, produits forestiers, *Quercus petraea*, *Fagus sylvatica*, *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus nigra* spp. *laricio*, modélisation, simulation

**Impact of different forest management strategies on the forests' carbon budget.
Modelling and simulation at the stand scale.**

Standing biomass capitalization and species substitution are two silvicultural strategies analyzed in this study. Both should lead to an additional increase of carbon stocks, a main issue of the XXIst century for mitigating the climate change. The first one corresponds to a slowing down of harvests that should generate an additional carbon sink by increasing the mean growing stocks. The second, substitution of slow-growing broadleaved high forests of sessile oak or beech by fast-growing coniferous plantations like Corsican Pine or Douglas Fir, should also lead to a faster absorption of CO₂. The impact of both strategies on carbon is even worthier to study considering that foresters already use this way of managing their forests.

The building up of a model chain taking into account all parts where carbon is implied (standing biomass, carbon soil, but also wood products generated by harvests) allowed us to simulate quantitative results following these practices.

We point out that the standing biomass capitalization would lead to an increase of carbon stock depending on the initial state of the stands, the site index and the new forest management practiced. It could rise up to 142 tC/ha in the most favourable case. The substitution of slow-growing broadleaved species by coniferous plantations would also be an important carbon sink (up to 2 tC/ha/year) for several decades, but would have a smaller mean carbon stock at steady state.

Keywords: Carbon storage, biomass, soils, wood products, *Quercus petraea*, *Fagus sylvatica*, *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus nigra* spp. *laricio*, modelling, simulation.