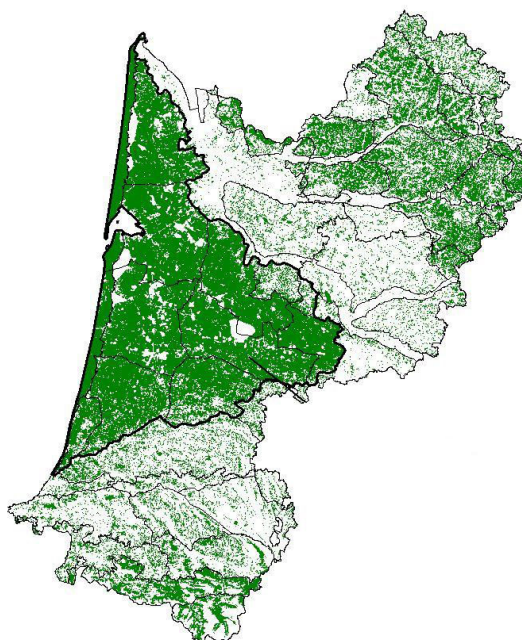


Evaluation des stocks et des flux de carbone liés à l'activité forestière en Aquitaine

**Indicateurs de gestion durable des forêts
Critère 1 « ressources forestières et cycle du carbone »**



Rapport final

**Antoine Colin
IFN Bordeaux**

Novembre 2004

Convention de prestations IFN / CRPF - n°2004-03-056

Etude financée avec l'aide de l'Union européenne, FEDER - Interreg IIIB Espace atlantique - et du Conseil Régional d'Aquitaine

Projet FORSEE www.iefc.net



Projet cofinancé par l'Union Européenne
Initiative Communautaire FEDER
INTERREG IIIB Espace Atlantique



SOMMAIRE

A. INTRODUCTION	1
1. Cadre de l'étude : le projet FORSEE.....	1
1.1. L'évaluation du caractère durable de la gestion des forêts	1
1.2. Objectifs et approche générale du projet FORSEE	2
1.3. Développement du projet FORSEE en Aquitaine.....	3
1.3.1. <i>Etat de l'art sur l'évaluation de la gestion durable des forêts en Aquitaine</i>	3
1.3.2. <i>Objectifs du projet FORSEE en Aquitaine</i>	3
1.3.3. <i>Organisation des travaux en Aquitaine</i>	4
2. Evaluation des indicateurs du critère 1 en Aquitaine	5
2.1. Revue des indicateurs de gestion durable du critère 1	5
2.2. Les objectifs en Aquitaine.....	6
2.3. Le choix des indicateurs à analyser en Aquitaine	6
 B. INDICATEUR « STOCK DE CARBONE » DU PROCESSUS D'HELSINKI	 7
1. Questions relatives à l'évaluation des stocks et flux de carbone en forêt	7
1.1. De nouvelles questions d'ordre méthodologique.....	7
1.2. Définitions et méthodologies internationales	7
1.3. Schéma national pour l'inventaire des émissions en forêt jusqu'en 2006	8
1.4. Schéma national pour l'inventaire des émissions en forêt à partir de 2007	9
1.5. Les questions méthodologiques posées à l'échelle de la région Aquitaine.....	10
1.6. Objectifs généraux de l'étude	10
2. Evaluation des stocks et des flux de carbone dans la biomasse des arbres.....	11
2.1. Définitions et approches méthodologiques générales.....	11
2.1.1. <i>Quelques définitions</i>	11
2.1.2. <i>Principes méthodologiques pour le calcul des stocks et des flux de carbone</i> ..	12
2.2. Objectifs de l'étude concernant la biomasse des arbres en Aquitaine	13
2.3. Données pour le calcul des stocks de carbone dans la biomasse des arbres	14
2.3.1. <i>Résultats d'inventaire de l'IFN</i>	14
2.3.2. <i>Eléments de réflexion pour le choix des coefficients de calcul</i>	15
2.3.3. <i>Les jeux de coefficients spécifiques au pin maritime landais</i>	16
2.3.4. <i>Les coefficients génériques « conifères et feuillus France »</i>	17
2.4. Méthodes pour le choix des coefficients de conversion les plus adaptés	18
2.4.1. <i>Choix du jeu de coefficients spécifiques pour le pin maritime</i>	18
2.4.2. <i>Comparaison des coefficients spécifiques et génériques pour les pins</i>	19
2.5. Méthodes pour le calcul des stocks et flux de carbone en Aquitaine	19
2.5.1. <i>Massif des Landes de Gascogne</i>	19
2.5.2. <i>Massifs Dordogne-Garonne et Adour-Pyrénées</i>	20
2.5.3. <i>Région administrative Aquitaine</i>	21
2.5.4. <i>Zone atelier de Pontenx</i>	21
2.6. Résultats.....	22
2.6.1. <i>Coefficients spécifiques robustes pour le calcul de la biomasse</i>	22
2.6.2. <i>Emploi des coefficients Carbofor sur le stock de carbone dans les pins</i>	23
2.6.3. <i>Stocks et flux de carbone sur le massif des Landes de Gascogne</i>	24
2.6.4. <i>Stocks et flux de carbone sur le massif Dordogne-Garonne</i>	30
2.6.5. <i>Stocks et flux de carbone sur le massif Adour-Pyrénées</i>	34
2.6.6. <i>Stocks de carbone au niveau de la région administrative Aquitaine</i>	36
2.6.7. <i>Stocks de carbone au niveau de la zone atelier de Pontenx</i>	37

3. Evaluation des stocks et flux de carbone dans les sols forestiers	37
3.1. Etat de l'art sur le stock et le stockage de carbone dans les sols	37
3.1.1. <i>Evaluation des stocks de carbone dans les sols</i>	37
3.1.2. <i>Enjeux liés à l'évaluation des stocks et flux de carbone des sols</i>	38
3.1.3. <i>Méthodes pour l'évaluation des stocks et flux de carbone des sols</i>	39
3.2. Objectifs de l'étude sur le carbone des sols forestiers en Aquitaine	40
3.3. Evaluation des stocks de carbone dans les sols forestiers en Aquitaine	40
3.3.1. <i>Données disponibles</i>	40
3.3.2. <i>Méthode de calcul des stocks de carbone des sols forestiers en Aquitaine</i>	41
3.4. Résultats	42
4. Bilan de l'indicateur « stocks de carbone » en Aquitaine	44
4.1. Méthodes de calcul des stocks et flux de carbone forestiers en Aquitaine	44
4.1.1. <i>Evaluation des stocks de carbone dans la biomasse ligneuse</i>	44
4.1.2. <i>Evaluation des flux de carbone dans la biomasse ligneuse</i>	45
4.1.3. <i>Evaluation des stocks et flux de carbone dans les sols forestiers</i>	45
4.1.4. <i>Perspectives d'amélioration de l'estimation des stocks et flux en Aquitaine</i>	46
4.2. Evaluation chiffrée de l'indicateur « carbone »	46
4.2.1. <i>Stocks et flux de carbone dans la biomasse ligneuse avant tempête</i>	47
4.2.2. <i>Impacts de la tempête de 1999</i>	47
4.2.3. <i>Stocks de carbone dans les sols forestiers</i>	48
4.3. Perspectives de stockage additionnel de carbone dans les forêts d'Aquitaine	48
4.3.1. <i>Stratégies de stockage dans la biomasse ligneuse</i>	48
4.3.2. <i>Gestion des stocks de carbone des sols forestiers</i>	50
 C. Evaluation des stocks de carbone dans les autres compartiments de l'écosystème	 52
1. Approches internationales	52
2. Approche locale	52
 D. Vers l'établissement du bilan de carbone de la filière forêt-bois landaise	 54
1. Les enjeux et les questions posées	54
1.1 Enjeux de l'établissement du bilan de carbone de la filière forêt-bois landaise	54
1.2. Approches méthodologiques dans les processus internationaux	55
1.3. Etudes pilotes pour démontrer le rôle de puits de carbone des produits bois	56
2. Objectifs de l'étude au niveau des Landes de Gascogne	56
3. Méthodes mises en œuvre au niveau du massif landais	57
3.1. Equation pour le calcul du bilan de carbone de la filière forêt-bois landaise	57
3.2. Evaluation des stocks et flux de carbone dans la futaie de pin maritime	57
3.3. Evaluation des stocks et flux de carbone dans les produits bois	57
3.3.1. <i>Protocole régional pour le calcul des stocks dans les produits bois</i>	57
3.3.2. <i>Evaluation de la dynamique de stockage dans les produits bois</i>	59
3.4. Estimation des émissions de carbone de la filière forêt-bois landaise	59
4. Principaux résultats de l'étude	59
4.1. Stocks et flux de carbone dans les produits bois de pin maritime	59
4.2. Contribution des produits bois dans le stock de carbone de la filière landaise	61
4.3. Emissions de carbone de l'activité forestière	62

4.4. Impacts des stratégies de stockage des acteurs.....	62
5. Limites de l'approche mise en œuvre et améliorations à envisager.....	63
5.1. Les détails techniques sont en cours de discussion au niveau national	63
5.2. Pistes pour dresser le bilan de carbone complet du secteur forêt-bois.....	63
5.2.1. <i>Au niveau de l'évaluation du stockage de carbone en forêt</i>	63
5.2.2. <i>Au niveau de l'évaluation du stockage de carbone dans les produits bois</i>	64
5.2.3. <i>Au niveau de l'évaluation des émissions de C du secteur forêt-bois</i>	64
5.2.4. <i>Au niveau des stratégies des acteurs socio-économiques</i>	64
E. Conclusions	65
1. Les protocoles mis en œuvre	65
1.1. Indicateur « stock de carbone forestier » du processus d'Helsinki.....	65
1.2. Bilan de carbone de l'activité forêt-bois en Aquitaine.....	65
2. Les perspectives pour accroître le rôle de l'activité forêt-bois dans la réduction de l'effet de serre additionnel.....	66
2.1. Le caractère de « puits de carbone » de l'activité forestière en Aquitaine	66
2.2. Les produits bois, une forme de stockage pérenne du carbone forestier.....	66
2.3. Développer l'usage des produits forestiers	67
BIBLIOGRAPHIE	68
ANNEXES	I

A. INTRODUCTION

1. Cadre de l'étude : le projet FORSEE

1.1. L'évaluation du caractère durable de la gestion des forêts

Depuis l'émergence en 1987 de la notion de « développement durable » (rapport Bruntland) et son avènement en 1992 lors du sommet de la Terre de l'ONU¹, les initiatives internationales en matière d'évaluation de la gestion forestière durable se sont multipliées.

Les pays européens se sont engagés dès 1990 (Strasbourg) dans un processus pour la protection et la gestion durable des forêts. En 1993 (Helsinki), les Parties ont adopté une définition commune de la gestion durable des forêts et initié une réflexion visant à définir les instruments de mesure relatifs à l'appréciation de l'état des forêts par rapport aux objectifs de la gestion durable préalablement définis.

C'est ainsi que le cycle des Conférences Interministérielles pour la Protection des Forêts en Europe, baptisé « processus d'Helsinki », a abouti à la définition d'une première liste de 6 critères et 27 indicateurs de gestion durable des forêts européennes (Lisbonne 1998). Les indicateurs peuvent être définis comme « des instruments qui permettent de décrire l'état des forêts, de prévoir leur évolution et d'orienter les décisions conduisant à la gestion durable des forêts ».

Par ce biais, les pays signataires s'engagent à assurer une gestion de leur ressource forestière qui préserve les potentialités du milieu.

En France, l'Administration forestière a confié à l'IFN² dès 1995 la publication périodique d'un état des lieux des forêts françaises au regard d'une série nationale d'indicateurs de gestion forestière durable. Ils sont basés sur la liste indicative du processus d'Helsinki.

Si le protocole technique pour l'évaluation de la durabilité de la gestion forestière semble désormais relativement bien en place au niveau national, il n'en va pas nécessairement de même au niveau régional. En effet, des indicateurs de gestion durable réfléchis à des échelles globales peuvent ne pas être pertinents en régions. Ils ne permettent pas de prendre en compte certaines spécificités locales, notamment en matière d'accès à l'information. Ainsi Samalens (2001) montre que seuls 41% des indicateurs issus du projet « Life indicateurs de gestion durable des forêts » (Piroche, 2002) peuvent être renseignés à l'échelle des 101.000 ha de la petite région forestière de Pontenx (40).

Par ailleurs, il apparaît nécessaire aux échelles régionales de s'interroger sur l'interprétation de l'information fournie par les différents indicateurs pour identifier le caractère durable de la gestion forestière. Ainsi, une forêt est-elle gérée durablement si et seulement si les indicateurs sont positifs au regard des recommandations chiffrées définies au niveau national ?

¹ ONU ; Organisation des Nations Unies

² IFN : Inventaire Forestier National

Par exemple, pour ce qui concerne le bois mort en forêt, est-ce pertinent de qualifier le caractère durable de la gestion forestière en se basant sur un seuil unique pour une forêt orientée vers la production soutenue de bois ou pour une forêt ancienne de montagne ? La question du rapport entre le coût et la pertinence de l'information fournie se pose également à l'échelle régionale.

Ces derniers points révèlent le besoin de définir *a priori* la pertinence des indicateurs au niveau de chaque massif forestier avant de développer les protocoles d'évaluation spécifiques appropriés.

Dans ce sens la conférence de Lisbonne (1998) a reconnu souhaitable d'élaborer des indicateurs susceptibles d'être utilisés pour évaluer la gestion à des échelles opérationnelles (bassins versants ou unité de gestion).

1.2. Objectifs et approche générale du projet FORSEE

Le projet FORSEE³ est un projet de coopération scientifique et technique interrégional (2003-2006) piloté par l'IEFC⁴. Il regroupe 9 régions dans 4 pays de l'Arc Atlantique (Espagne, Portugal, France et Irlande). En Aquitaine, le projet FORSEE bénéficie d'un cofinancement du programme d'initiative communautaire Interreg IIIB « Espace Atlantique » et du Conseil Régional d'Aquitaine.

L'objectif de FORSEE est de développer, dans les régions participantes, les méthodes, les outils et les compétences pour l'évaluation, le suivi et la promotion de la gestion durable des forêts à des échelles opérationnelles. Pour cela, le travail s'appuie sur un test en vraie grandeur d'indicateurs de gestion durable afin d'en vérifier la pertinence, la faisabilité et le coût.

La liste de départ des critères et des indicateurs de gestion durable considérée dans l'étude est celle définie par le processus d'Helsinki (Vienne 2003). La gestion durable des forêts y est évaluée selon 6 critères (tableau 1).

<i><u>CRITERE 1</u> : Conservation et amélioration appropriée des ressources forestières et de leur contribution au cycle global du carbone</i>
<i><u>CRITERE 2</u> : Maintien de la santé et de la vitalité des écosystèmes forestiers</i>
<i><u>CRITERE 3</u> : Maintien et encouragement des fonctions de production des forêts (bois et hors bois)</i>
<i><u>CRITERE 4</u> : Maintien, conservation et amélioration appropriée de la diversité biologique dans les écosystèmes forestiers</i>
<i><u>CRITERE 5</u> : Maintien et amélioration appropriée des fonctions de protection dans la gestion des forêts (notamment sol et eau)</i>
<i><u>CRITERE 6</u> : Maintien d'autres bénéfices et conditions socio-économiques</i>

Tableau 1 : Les 6 critères de gestion durable des forêts du processus d'Helsinki

³ FORSEE : gestion durable des forêts : un réseau européen de zones pilotes pour la mise en œuvre opérationnelle

⁴ IEFC : Institut Européen de la Forêt Cultivée

Six comités d'experts interrégionaux ont été constitués dans le cadre du projet FORSEE autour des 6 critères de gestion durable. Il s'agit dans ces groupes :

- De retenir les indicateurs du processus d'Helsinki les plus pertinents aux échelles opérationnelles,
- Eventuellement de les compléter avec des indicateurs issus des autres processus internationaux pour la gestion durable des forêts ou dans les conventions internationales (climat, biodiversité),
- D'arrêter les protocoles communs pour leur évaluation.

Les échelles opérationnelles pour tester les indicateurs sont définies par les acteurs régionaux en fonction de critères fonctionnels. Elles peuvent être : (1) une zone atelier de plusieurs milliers d'ha, (2) et/ou un massif forestier homogène pour des caractères sylvicoles, pédo-climatiques, juridiques ou culturels.

1.3. Développement du projet FORSEE en Aquitaine

1.3.1. Etat de l'art sur l'évaluation de la gestion durable des forêts en Aquitaine

Dès 1996, à la demande de l'interprofession forêt-bois régionale, des groupes d'experts (scientifiques, universitaires, économistes, sylviculteurs, industriels, historiens) ont été constitués pour renseigner l'impact sur les milieux et les populations de l'activité forestière pratiquée sur le massif landais. Le bilan des connaissances de l'époque au regard des 6 critères de gestion durable du processus d'Helsinki a fait l'objet d'une restitution au cours du IV^{ème} colloque ARBORA⁵ (1997) intitulé « De la gestion au développement durable ».

Assimilé au départ comme simplement relatif à la notion de rendement soutenu, le concept de gestion durable des forêts en Aquitaine est apparu peu à peu comme beaucoup plus ambitieux. Il permet en effet d'aborder les problématiques actuelles liées au cycle du carbone, de l'eau, des éléments minéraux, à la biodiversité, à la santé des forêts, ainsi qu'aux fonctions socio-économiques et récréatives des forêts.

Afin de conforter les engagements régionaux dans le sens de la gestion durable des forêts, la « charte de gestion durable » a été signée en mai 1999 par tous les acteurs privés et publics de la filière forêt-bois Aquitaine.

Cette démarche était largement plébiscitée par les industriels en réponse au développement potentiel de la demande des marchés pour des bois issus de forêts gérées durablement.

Ainsi, le comité PEFC⁶ pour la certification de la gestion durable des forêts en Aquitaine a vu le jour fin 2000. Dès 2001, l'état des lieux des forêts d'Aquitaine était réalisé selon les indicateurs de gestion durable retenus par l'association PEFC France. Un guide des bonnes pratiques en sylviculture, travaux sylvicoles et exploitation forestière a été publié courant 2002. A ce jour 619.000 ha de forêts produisent du bois certifié PEFC en Aquitaine.

1.3.2. Objectifs du projet FORSEE en Aquitaine

Dans ce contexte, l'enjeu du projet FORSEE en Aquitaine est d'améliorer l'évaluation du caractère durable de la gestion forestière pratiquée en Aquitaine.

⁵ ARBORA : Association pour la Recherche sur la production forestière et le Bois en Région Aquitaine

⁶ PEFC : Pan European Forest Certification

Pour cela les partenaires régionaux du projet FORSEE sont invités à :

- Evaluer la pertinence des indicateurs de gestion durable à des échelles opérationnelles,
- Tester des protocoles fiables et reproductibles,
- Evaluer *a posteriori* le coût engendré par le renseignement de ces indicateurs,
- Développer l'expertise régionale et mettre en place un système de collecte de l'information.

1.3.3. Organisation des travaux en Aquitaine

En Aquitaine le pilotage scientifique du projet FORSEE est confié au GIS OFORA⁷. Créé en 2002, il regroupe 8 acteurs de la recherche et du développement forestier régional (AFOCEL⁸, Cemagref, CPFA⁹, CRPF¹⁰, DSF¹¹, IFN, INRA¹², et ONF¹³).

L'OFORA constitue un forum de réflexion sur les questions ayant trait à l'évaluation de la gestion durable des forêts régionale. Il a également pour objectif de mettre en commun des données sur l'état des forêts d'Aquitaine.

Les activités au sein de l'OFORA sont organisées en 6 groupes opérationnels, correspondants aux 6 critères de gestion durable du processus d'Helsinki.

Pour les besoins du projet FORSEE, les acteurs de l'OFORA ont retenu 2 échelles opérationnelles pour lesquelles ils se proposent de développer des protocoles fiables et reproductibles d'évaluation des indicateurs jugés les plus pertinents.

- La zone atelier de Pontenx-les-Forges dans les Landes

Cette petite région forestière a été choisie par les partenaires de l'OFORA car elle constitue un échantillon *a priori* représentatif du milieu naturel et des pratiques forestières mises en œuvre sur le massif des Landes de Gascogne (Samalens, 2001). Située au cœur du massif landais (carte 1), elle occupe 101.000 ha dont près de 85.000 sont boisés de pins maritimes traités en futaie régulière.

- Les 3 massifs forestiers clairement distingués en Aquitaine

Les professionnels aquitains ont identifié 3 massifs forestiers pour leurs démarches politiques et commerciales de certification PEFC.

Extraits de « Etat des lieux portant sur la gestion durable des forêts en Aquitaine », comité PEFC Aquitaine 2001.

« Des critères physiques permettent de distinguer 3 ensembles majeurs en Aquitaine. La zone **Dordogne Garonne**, au nord-est, est un ensemble de plateaux calcaires [...] entrecoupés de vallées fluviales [...]. L'ouest de la région Aquitaine est un bassin sédimentaire sableux très plat [...], les **Landes de Gascogne**. [...]. Enfin, la zone **Adour Pyrénées** [...] est la plus hétérogène [...] (carte 2).

⁷ GIS OFORA : Groupement d'Intérêt Scientifique - Observatoire des Forêts d'Aquitaine

⁸ AFOCEL : Association Forêt Cellulose

⁹ CPFA : Centre de Productivité Forestière d'Aquitaine

¹⁰ CRPF : Centre Régional de la Propriété Forestière

¹¹ DSF : Département Santé des Forêts – Ministère de l'Agriculture

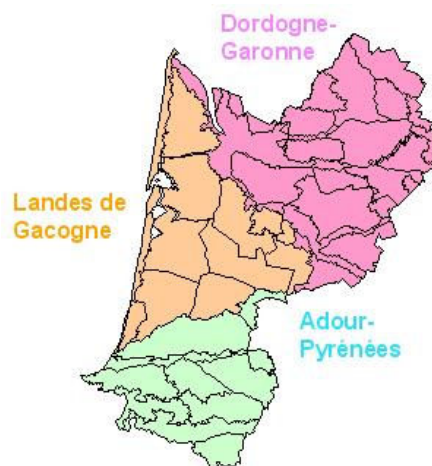
¹² INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

¹³ ONF : Office National des Forêts

Zone atelier de Pontenx-les-Forges
dans les Landes



Carte 1 : Zone atelier de Pontenx



Carte 2 : Les 3 massifs PEFC en Aquitaine

Les formations forestières rencontrées sur ces 3 ensembles sont également bien distinctes, en lien avec des particularités physiques des milieux [...], et l'histoire propre à chacune des zones. Chênaie et châtaigneraie constituent les formations forestières les plus fréquentes en Dordogne-Garonne, les [...] Landes de Gascogne sont [...] dominées par la forêt cultivée de Pin maritime, [...] les forêts d'Adour Pyrénées [...] sont dominées par la chênaie et la hêtraie.

La gestion des forêts [...] y est conditionnée par les potentialités pédo-climatiques. Les 3 zones sont [...] pertinentes pour la mise en œuvre de la politique de gestion durable tenant compte des découpages du milieu naturel, des compétences des institutions et des différences culturelles. Les Orientations Régionales Forestières (en projet), utilisent ce découpage pour définir la politique forestière régionale. »

2. Evaluation des indicateurs du critère 1 en Aquitaine

2.1. Revue des indicateurs de gestion durable du critère 1

Par ce qu'il réalise l'inventaire permanent de la ressource forestière, les travaux concernant le critère n°1 « ressources forestières et carbone » au sein de l'OFORA ont tout naturellement été confiés à l'IFN. L'INRA et le CRPF s'y associent.

Les indicateurs proposés pour renseigner le critère n°1 du processus d'Helsinki (Vienne 2003) requièrent des variables mesurées par l'IFN (tableau 2). Il s'agit (1) de la surface boisée et (2) du volume sur pied, ventilés par structures forestières et discrétisés en classes d'âge pour les peuplements équiennes ou en classes de diamètre pour les peuplements irréguliers.

Critère	N°	Indicateur	Texte complet
C1 : Conservation et amélioration appropriée des ressources forestières et de leur contribution au cycle global du carbone	1.1	Surface forestière	Surface de forêts et autres terres boisées, classées par type de forêts et par disponibilité pour la production de bois et pourcentage de forêts et autres terres boisées par rapport à la surface totale du pays.
	1.2	Volume sur pied	Volume sur pied des forêts et autres terres boisées, classé par type de forêts et par disponibilité pour la production de bois.
	1.3	Structures par classes d'âge et/ classes de diamètre	Structures par classes d'âge et/ classes de diamètre des forêts et autres terres boisées, classées par type de forêts et par disponibilité pour la production de bois.
	1.4	Stock de carbone	Stock de carbone de la biomasse ligneuse et des sols des forêts et autres terres boisées.

Tableau 2 : Indicateurs paneuropéens améliorés pour une gestion forestière durable (Vienne 2003)

2.2. Les objectifs en Aquitaine

Dans la logique du projet FORSEE, l'IFN a choisi de mettre l'accent de manière spécifique sur les indicateurs dont l'évaluation se révèle complexe aujourd'hui. L'emploi de définitions (FAO¹⁴) et de protocoles validés au niveau international (IPCC¹⁵) a été privilégié. Les protocoles développés doivent être reproductibles lors de la fourniture de données actualisées aux différentes échelles opérationnelles.

Le 2^{ème} objectif est de produire des données qui permettent aux partenaires FORSEE d'évaluer certains indicateurs parmi les 5 autres critères d'Helsinki.

2.3. Le choix des indicateurs à analyser en Aquitaine

L'évaluation de la surface forestière (**indicateur 1.1**) a permis de tester l'impact sur la surface boisée régionale de l'emploi des définitions développées par la FAO à l'occasion de son enquête sur l'état des ressources forestières mondiales (GRFA¹⁶ 2005). Le protocole développé et nos résultats au niveau de la région Aquitaine et des 3 massifs PEFC sont en annexe 1.

L'**indicateur 1.2** (volume sur pied) a été renseigné au niveau de la zone de Pontenx. Il intéresse directement les partenaires FORSEE des critères 3 (fonctions de production) et 6 (fonctions socio-économiques). Le détail de la méthode mise en œuvre et les résultats ventilés par essences et par classes d'âge sont en annexe 2.

Les nouveaux enjeux relatifs à la contribution des forêts au cycle du C ont conduit à mettre spécifiquement l'accent dans FORSEE sur la mise au point de protocoles d'évaluation des stocks et des flux de C dans la biomasse ligneuse et dans les sols forestiers (**indicateur 1.4**) à l'échelle de la région Aquitaine, des 3 massifs aquitains et de la zone de Pontenx. Par ailleurs, le CRPF a souhaité que l'IFN étudie la possibilité de développer une méthode d'évaluation du bilan global de C de la filière forêt-bois landaise ; c'est-à-dire en intégrant les flux de C de tous les compartiments de l'écosystème, des produits bois et les émissions liées à l'activité forestière.

En effet, l'IFN a développé au cours des dernières années une expertise incontournable en France métropolitaine dans l'évaluation des stocks et flux de C forestiers. Ainsi, outre le renseignement périodique des indicateurs de gestion durables des forêts françaises pour le compte du Ministère de l'Agriculture, l'IFN a participé au projet de recherche CARBOFOR¹⁷ visant à améliorer les coefficients nationaux pour la conversion du volume inventorié en forêt en masse de C (§ B.2.3).

L'évaluation de l'**indicateur 1.3** relatif à la ventilation des résultats d'inventaire par structures forestières a été écartée pour 2 raisons : (1) son évaluation ne présente pas de difficultés particulières à partir des données d'inventaire, (2) les partenaires aquitains n'ont pas manifesté d'intérêt spécifique pour son renseignement.

Finalement, pour chacun des 3 indicateurs du critère 1 retenus dans FORSEE, le type de résultats disponibles et leur format de présentation est précisé en annexe 3.

¹⁴ FAO : Food and Agriculture Organization / ONU

¹⁵ IPCC : Intergovernmental Panel of experts on Climate Change

¹⁶ GFRA : Global Forest Resource Assessment

¹⁷ Projet CARBOFOR : Consortium regroupant 14 partenaires, financé par les programmes "Gestion et impacts du changement climatique" (GICC) du Ministère de l'écologie et du développement durable et "Forêt et Climat" du Groupement d'intérêt public écosystèmes forestiers (GIP Ecofor).

B. INDICATEUR « STOCK DE CARBONE » DU PROCESSUS D'HELSINKI

1. Questions relatives à l'évaluation des stocks et flux de carbone en forêt

1.1. De nouvelles questions d'ordre méthodologique

La contribution des forêts au cycle mondial du carbone et leur rôle dans la lutte contre les changements climatiques a été consacrée avec l'adoption en 1992 de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (UNFCCC¹⁸) et plus tard en 1997 du protocole de Kyoto.

En parallèle, le processus d'Helsinki pour la définition et la mise en œuvre de la gestion durable des forêts en Europe intégrait cette « nouvelle » fonction de la forêt parmi ses critères d'évaluation du caractère durable de la gestion forestière (Vienne, 2003). De plus la résolution n°5 de Vienne (annexe 4) engage depuis 2003 les états signataires (i) à contribuer à la mise en œuvre de l'UNFCCC et du protocole de Kyoto en encourageant les bonnes pratiques de gestion forestière, et (ii) à participer aux travaux méthodologiques en cours dans le cadre de l'UNFCCC.

Pour ces états, la reconnaissance du rôle des forêts dans la réduction de l'effet de serre s'accompagne de nouvelles questions (i) méthodologiques, (ii) scientifiques, en ce qui concerne par exemple le fonctionnement des écosystèmes forestiers dans un environnement changeant, et encore (iii) liées aux pratiques visant à favoriser le stockage de carbone par les écosystèmes forestiers.

Les questions méthodologiques qui ont intéressé cette étude concernent l'évaluation des quantités de C séquestrées dans les écosystèmes forestiers puisque chaque état signataire de l'UNFCCC doit être en mesure de rapporter périodiquement sur le stockage de C dans ses forêts. Il est alors indispensable de bien définir les domaines d'études considérés (forêt, compartiments de C de l'écosystème, etc.) et de mettre au point des méthodes de quantification des stocks et des flux de C forestier en fonction des données disponibles aux échelles nationales et/ou régionales.

1.2. Définitions et méthodologies internationales

L'IPCC est mandaté par l'ONU pour proposer aux états signataires de l'UNFCCC et du protocole de Kyoto un cadre commun de définitions et de méthodologies pour la rédaction de leurs rapports, et notamment celui concernant le secteur d'activité « utilisation des terres et forêts » noté LULUCF¹⁹ en anglais.

Dans son rapport « good practice guidance for LULUCF » paru en 2003, l'IPCC apporte un grand nombre de précisions méthodologiques et propose une refonte importante du schéma servant jusque là aux états pour éditer leurs rapports annuels. La quantité totale de C de l'écosystème à l'instant t représente la somme des stocks présents dans chacun des 5 compartiments définis dans le tableau 3.

¹⁸ UNFCCC : United Nation Framework Convention on Climate Change

¹⁹ LULUCF : Land Use, Land Use Change and Forestry

Definitions for terrestrial carbon pools in the forest ecosystem		
Carbon pools		Description
Living biomass	Above-ground biomass	All living biomass above the soil including stem, stump, branches, bark, seeds and foliage. Note : in cases where forest understorey is a relatively small component of the above-ground biomass carbon pool, it is acceptable for the methodologies and associated data used in some tiers to exclude it, provided the tiers are used in a consistent manner throughout the inventory time series as specified in Chapter 5.
	Below-ground biomass	All living biomass of live roots. Fine roots of less than (suggested) 2 mm diameter are often excluded because these often cannot be distinguished empirically from soil organic matter or litter.
Dead organic biomass	Dead wood	Includes all non-living woody biomass not contained in the litter, either standing, lying on the ground, or in the soil. Dead wood includes wood lying on the surface, dead roots, and stumps larger than or equal to 10 cm in diameter or any other diameter used by the country.
	Litter	Includes all non-living biomass with a diameter less than a minimum diameter chosen by the country (for example 10 cm), lying dead in various states of decomposition above the mineral or organic soil. This includes the litter, fomic and humic layers. Live fine roots (of less than the suggested diameter limit for below-ground biomass) are included in litter where they cannot be distinguished from it empirically.
Soils	Soil organic matter	Includes organic carbon in mineral and organic soils (including peat) to a specified depth chosen by the country and applied consistently through the time series. Live fine roots (of less than the suggested diameter limit for below-ground biomass) are included with soil organic matter where they cannot be distinguished from it empirically.
Note : National circumstances may necessitate slight modifications to the pool definitions used here. Where modified definitions are used, it is good practice to report upon them clearly, to ensure that modified definition are used consistently over time, and to demonstrate that pools are neither omitted nor double counted		

Tableau 3 : Définitions des 5 compartiments de carbone l'écosystème forestier (IPCC, 2003)

Des méthodes spécifiques de calcul des stocks et des flux de C sont proposées pour chaque compartiment.

Enfin, les résultats nationaux sont synthétisés dans de nouveaux tableaux encore sujets à discussion au niveau international et qui devront être renseignés par tous les pays à partir de 2007.

Les recommandations issues du rapport de l'IPCC entraînent la constitution de groupes de réflexion *ad hoc* aux échelles nationales pour la mise au point courant 2006 de la meilleure stratégie de réponse nationale. En effet, les définitions et les recommandations méthodologiques de l'IPCC sont suffisamment souples pour permettre à chacun de renseigner les tableaux en fonction du niveau de précision des données qui sont à sa disposition (approche dite par « tiers »).

1.3. Schéma national pour l'inventaire des émissions en forêt jusqu'en 2006

Le CITEPA²⁰, centre national de référence pour les inventaires d'émission dans l'air, est chargé par le MEDD²¹ d'éditer pour le compte de la France les rapports relatifs aux émissions de gaz à effet de serre par les sources et absorptions par les puits.

Jusqu'à maintenant, pour établir le rapport du secteur LULUCF, le CITEPA recueille des données auprès de l'IFN, du SCEES²² et de l'Observatoire de l'Energie.

De façon condensée, les émissions du secteur LULUCF sont calculées pour la **France entière** en 4 grandes étapes :

²⁰ CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etude sur la Pollution Atmosphérique.

²¹ MEDD : Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

²² SCEES : Service Central d'Etudes et d'Enquêtes Statistiques / MAAPAR.

- Etape 1 : Calcul du puits de CO₂

Il s'agit dans un premier temps de calculer le puits brut correspondant à la différence entre l'accroissement et les prélèvements annuels. L'IFN transmet au CITEPA ses résultats sur l'accroissement des conifères et des feuillus au niveau national. Le CITEPA applique à ces volumes des facteurs d'expansion de biomasse qui permettent de prendre en compte la croissance de l'ensemble de la biomasse aérienne et racinaire.

Dans un second temps, le CITEPA évalue les prélèvements sur la ressource à partir (i) des données de récoltes de la filière commerciale fournies par le SCEES et (ii) des évaluations de quantité de bois ramassé dans le cadre des circuits non commerciaux (bois de feu) fournies par l'Observatoire de l'Energie.

- Etape 2 : Conversion des forêts (défrichements)

Lors de la conversion des forêts une quantité notable de C est réémise sous forme de CO₂ par la biomasse et les sols. Les surfaces en défrichement sont estimées sur la base des résultats de l'enquête TerUti²³.

- Etape 3 : Déprise agricole (entraînant un boisement volontaire accompagné)

Selon la définition de l'IPCC (2000) il s'agit du boisement sous l'action de l'homme de terres issues de la déprise agricole. Le stockage additionnel de C dans la biomasse est pris en compte par l'IFN dans l'accroissement du volume qu'il mesure.

- Etape 4 : Puits et émissions des sols

Une matrice des changements d'affectation des sols est obtenue par l'enquête TerUti. Des coefficients spécifiques permettent d'estimer les émissions ou les puits liés à ces changements d'affectation.

Dans cette méthode le CITEPA assimile la récolte de biomasse ligneuse à une émission instantanée du C qu'elle séquestre. Cette hypothèse est conforme aux recommandations de l'IPCC pour la première période d'engagement du protocole de Kyoto. Bien que le CITEPA juge cette hypothèse simplificatrice, il considère que l'équilibre supposé entre récolte et émission permet de palier aux manques de connaissances sur la variation des stocks de bois manufacturés et que ce choix se révèle être raisonnable hors événements exceptionnels (tempêtes de 1999).

1.4. Schéma national pour l'inventaire des émissions en forêt à partir de 2007

Selon le CITEPA, « le guide de bonnes pratiques pour le secteur LULUCF et le nouveau format de rapportage vont amener à revoir de façon substantielle la méthodologie utilisée en France et, en particulier, avoir des répercussions sur les besoins de données d'entrée pour le calcul des émissions/puits ».

En France, un groupe de réflexion a été constitué pour l'élaboration à l'horizon 2007 d'une stratégie de réponse à l'UNFCCC et au protocole de Kyoto. Les travaux sont supervisés par le CITEPA. L'IFN, le SCEES, l'ONF et la MIES²⁴ s'y associe.

Il s'agit d'arrêter les définitions relatives aux forêts, aux forêts gérées et aux différents compartiments de C de l'écosystème. D'identifier les données sources, de valider les méthodes (annuelles ou interpolées) de calcul des stocks et des flux de C

²³ TerUti : Enquête annuelle du SCEES pour évaluer l'utilisation du territoire.

²⁴ MIES : Mission Interministérielle de l'Effet de Serre

dans chaque compartiment. De retenir les coefficients multiplicateurs et/ou équations associées aux calculs, de mettre en place un système de suivi des changements d'usage des sols et de contrôle des surfaces concernées à l'échelle adéquate, d'estimer les surfaces et stocks de C pour l'année de référence 1990, etc.

On retiendra qu'aucune décision finale n'a encore été arrêtée concernant la méthode pour le calcul des émissions dans l'air à partir de 2007 au niveau national, seul niveau habilité à rapporter dans le cadre de l'UNFCCC et du protocole de Kyoto.

1.5. Les questions méthodologiques posées à l'échelle de la région Aquitaine

Si les décisions concernant le schéma de réponse et les méthodes de calculs pour l'UNFCCC et pour le protocole de Kyoto ne peuvent être prises qu'au niveau national, des approches régionalisées contribuent à alimenter la réflexion en cours.

Parce que le secteur forêt-bois aquitain participe activement au cycle du carbone (i) de manière directe en tant que réservoir en forêt, et (ii) de manière indirecte en produisant des biens et de l'énergie se substituant aux combustibles fossiles et aux matériaux à forts intrants énergétiques (acier, ciment, aluminium), l'évaluation des stocks et des flux de C du système forêt-bois régional représente des enjeux environnementaux et économiques croissants en Aquitaine. En effet, un bilan de C positif permettrait à la filière de mettre en avant le rôle bénéfique du bois dans la lutte contre les changements climatiques. Ainsi, le caractère de puits de C servirait à la promotion commerciale des bois PEFC et offrirait à la filière un crédit de C qui pourrait être mis en avant dans l'acquisition d'une rémunération financière pour le service rendu. Toutefois, une rétribution de la sorte n'est pas encore à l'ordre du jour.

Au niveau de la région Aquitaine, la question de l'évaluation des stocks et des flux de C en forêt se pose dans une approche économique. Ainsi, le document cadre définissant les objectifs de la politique de gestion durable du massif landais engage les adhérents de PEFC Aquitaine à « contribuer au stockage du C en favorisant un accroissement soutenu tout au long de la vie du peuplement ».

Mais avant de considérer les options visant à accroître le stockage, il reste à préciser les moyens pour évaluer les stocks et les flux de C de l'écosystème à l'instant t . Quelles données utiliser ? Quels coefficients de conversion employer ? Comment les construire ? Doivent-ils être spécifiques à la région Aquitaine ou bien génériques et applicables à tous les arbres des forêts françaises ? Quelles incertitudes leurs sont associées ? Comment surveiller l'évolution des stocks et estimer les flux sur une période donnée ?

Et au niveau de la filière forêt-bois régionale : comment évaluer le stock de C dans les produits transformés ? Combien de tonnes de C le secteur forêt-bois émet-il pour la production, l'exploitation, la transformation, le transport des produits ? Enfin, quel est le bilan net de C de l'activité forêt-bois en Aquitaine ?

1.6. Objectifs généraux de l'étude

D'après l'IPCC (2003), le stock de C des forêts comprend le carbone des arbres vivants, du bois mort sur pied et au sol (nécromasse), de la végétation du sous-bois (herbacées et ligneux bas), de la litière et de la matière organique du sol.

En 1999, Dupouey évaluait que les forêts françaises séquestraient 2000 MtC (figure 1) dont 51% dans les sols et 41% dans la biomasse aérienne et racinaire.

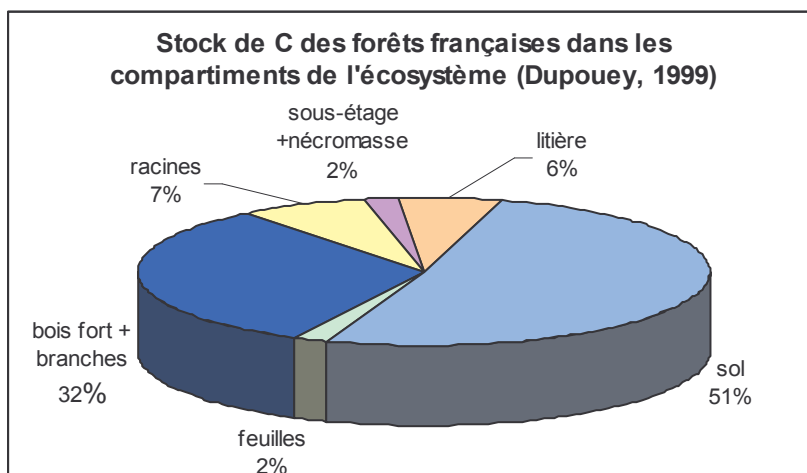


Figure 1 : répartition du stock de C dans les compartiments de l'écosystème

A l'échelle de la région Aquitaine et des 3 massifs PEFC qui la compose, **la mission consiste à mettre au point une méthode fiable et reproductible d'évaluation de l'indicateur du processus d'Helsinki sur le stock de C des forêts.**

Il s'agit alors de calculer les stocks et flux de C de chacun des compartiments de l'écosystème, avec un intérêt particulier pour la biomasse ligneuse et les sols compte tenu de leur contribution prépondérante au stock de C total de l'écosystème.

Il nous était également demandé d'élaborer une méthode de calcul du bilan de C de **la filière forêt-bois landaise** à partir des données et des connaissances disponibles au niveau régional. **Il s'agit alors d'évaluer les flux de C en forêt, dans les produits bois de pin maritime, ainsi que les émissions de l'ensemble du secteur.** Le choix du massif landais comme support de l'étude s'explique par :

- Les enjeux croissants associés à l'évaluation des stocks et flux de C à l'échelle d'un massif cultivé et où le secteur bois est fortement développé,
- L'essence pin maritime est le support de travaux de recherche qui permettent d'établir des équations robustes pour le calcul des stocks de C dans la biomasse ligneuse,
- Toutes les industries sont présentes sur le massif et les flux de matières entre les filières y sont mieux connus que sur les autres massifs régionaux.

2. Evaluation des stocks et des flux de carbone dans la biomasse des arbres

2.1. Définitions et approches méthodologiques générales

2.1.1. Quelques définitions

Avant de décrire les objectifs relatifs à l'évaluation des stocks et flux de C dans la biomasse des arbres et de présenter les méthodes qui ont été mises en œuvre en Aquitaine, il s'impose de définir les termes qui seront employés par la suite.

Conformément à la définition internationale, le terme « biomasse » employé ici correspond au poids sec (matière sèche) constant pour un séchage à 65°C.

La « biomasse des arbres » s'entend comme la somme de la « biomasse aérienne » et de la « biomasse racinaire ». La formule ci-dessous précise ces 2 derniers termes.

Biomasse des arbres = Biomasse aérienne + Biomasse racinaire

Biomasse aérienne = Biomasse ligneuse + Biomasse feuilles

Biomasse ligneuse = Biomasse tronc + Biomasse branches

Biomasse racinaire = Biomasse racines_structure + Biomasse racines_fines

Le « volume de bois fort » est mesuré par l'IFN pour toutes les tiges recensables, c'est à dire dont le DHP²⁵ est supérieur à 7,5 cm. Il est mesuré sur écorce et arrêté à la découpe commerciale de 7 cm.

« L'infradensité du bois » est la masse anhydre du bois rapporté à son volume à l'état vert. Pour une tige donnée, elle permet de passer du volume de bois fort à la biomasse de tronc.

La « teneur en carbone du bois » est la proportion de C dans la matière sèche totale.

Le « facteur d'expansion » est un terme générique qui peut varier selon les auteurs. Il s'agit d'un ratio permettant de passer rapidement d'une variable connue (par exemple le volume de bois fort) à la variable que l'on souhaite évaluer (par exemple le volume ligneux aérien et racinaire).

Les « équations au niveau arbre » sont des relations qui permettent d'évaluer le volume (tarifs de cubage) ou la biomasse (équation de biomasse) d'une tige à partir de son âge ou de certaines de ses grandeurs dendrométriques (hauteur, DHP).

2.1.2. Principes méthodologiques pour le calcul des stocks et des flux de carbone

- Méthodes pour le calcul des stocks de C dans la biomasse des arbres

Deux approches sont proposées pour estimer le stock de C d'un arbre à partir des données d'inventaire (IPCC, 2003) :

La première, décrite par Dupouey en 1999, consiste à convertir le volume de bois fort d'un peuplement (VIFN) en volume total aérien ou en biomasse par l'intermédiaire de facteurs d'expansion (FEBR). Cette grandeur est ensuite convertie en masse de C en appliquant un taux de C moyen dans le bois (CARB) et une valeur d'infradensité du bois (DENS). On calcule le stock (C) de la manière suivante (1) :

$$(1) \quad C = \text{VIFN} \times \text{FEBR} \times \text{DENS} \times \text{CARB}$$

La seconde option permet d'estimer le volume ligneux ou la biomasse d'un arbre à l'aide de son âge et de ses grandeurs dendrométriques (hauteur, DHP) utilisées en entrée d'équations au niveau arbre. La méthode se résume ainsi (2) :

$$(2) \quad C = \text{Equation(arbre)} \times \text{CARB} \times \text{DENS}$$

²⁵ DHP : Diamètre à Hauteur de Poitrine

Les facteurs d'expansion **FEBR** et les équations au niveau arbre peuvent être (i) spécifiques pour une essence donnée, dans une région et une structure forestière, (ii) ou génériques et applicables au niveau national à l'ensemble des groupes d'essences (conifères et feuillus) dans toutes les structures forestières.

- Méthodes pour le calcul des flux de C dans la biomasse des arbres

Deux approches sont théoriquement possibles pour calculer les flux de C dans la biomasse à l'échelle d'une forêt (IPCC 2003). Dupouey (2000) détaille les avantages et les limites de chacune dans le cas d'une mise en œuvre en France.

La méthode du bilan entrées/sorties (ou méthode par défaut selon l'IPCC), consiste, au pas de temps annuel, à retrancher du flux entrant (accroissement + recrutement) tous les flux de biomasse ligneuse sortants (récoltes + pertes d'exploitation + mortalité).

Il s'agit de la méthode retenue par le CITEPA pour calculer le puits de C forestier (§ B.1.3). Si le flux entrant est relativement bien estimé par l'IFN, l'évaluation des flux sortants est quant à elle plus difficile à mesurer. En effet, les données implémentées proviennent de sources hétérogènes et parfois incomplètes, notamment en ce qui concerne le volume de bois de feu non pris en compte dans les statistiques nationales ou le volume des rémanents de coupe laissés en forêt.

L'intérêt de cette méthode est de fournir une estimation de la biomasse récoltée. En associant à chaque type de produits récoltés une durée de vie spécifique, on peut estimer le stockage de C dans les produits bois (§ D.3.3).

La seconde méthode consiste à calculer les flux de C par comparaison des stocks entre 2 dates (t1 et t2). On a (3) :

$$(3) \quad \Delta C_{\text{biomasse_arborée}} = (C_{t2} - C_{t1}) / (t2 - t1)$$

La continuité et la périodicité des inventaires de l'IFN confèrent une fiabilité satisfaisante aux résultats issus de cette méthode de calcul. Pour une bonne interprétation, il est nécessaire ici de veiller à comparer des stocks de C calculés à partir des mêmes coefficients multiplicateurs.

2.2. Objectifs de l'étude concernant la biomasse des arbres en Aquitaine

L'objectif général de l'étude est la définition, à partir des données de l'IFN, de méthodes simples et robustes d'estimation des stocks et des flux de C dans la biomasse des arbres aux échelles régionales et sub-régionales.

Elles doivent permettre aux organismes qui le désirent (par exemple le comité PEFC Aquitaine) de calculer périodiquement les stocks et les flux de biomasse ligneuse et de carbone à des échelles opérationnelles.

Les objectifs spécifiques sont :

- (i) D'évaluer et de comparer les stocks de C dans la biomasse des pins calculés avec l'équation de biomasse et des facteurs d'expansion spécifiques,
- (ii) D'évaluer l'impact de l'emploi de coefficients génériques sur les stocks,
- (iii) De préciser les critères qui guident le choix de la méthode de calcul,
- (iv) D'estimer les stocks et flux de C,
- (v) D'identifier les options pour maintenir et accroître le stock de C des forêts.

2.3. Données pour le calcul des stocks de carbone dans la biomasse des arbres

2.3.1. Résultats d'inventaire de l'IFN

Que ce soit par les facteurs d'expansion ou par les équations au niveau arbre, le calcul des stocks de C dans la biomasse des arbres utilise en entrée les résultats statistiques de l'IFN. La méthode des facteurs d'expansion requière le volume de bois fort calculé par l'IFN au niveau du peuplement. Les équations au niveau arbre utilisent quant à elles les données dendrométriques levées au niveau des tiges.

Les données employées dans cette étude sont issues de l'« ancienne » méthode d'inventaire. Elle est basée sur un échantillonnage stratifié de la ressource ligneuse au niveau départemental. La périodicité des inventaires dans chaque département est d'environ 12 ans. La « nouvelle » méthode, mise en œuvre à partir de novembre 2004, consiste à inventorier un échantillon de la ressource retenu à partir d'un maillage systématique du territoire. L'inventaire est réalisé chaque année sur l'ensemble du territoire métropolitain. Les premiers résultats issus de la nouvelle méthode d'inventaire n'étaient pas disponibles pour l'étude.

Jusqu'en octobre 2004, l'échantillon statistique de l'IFN était stratifié selon 3 critères principalement : le type de formation végétale, la nature juridique de la propriété (domanial, communal, privé), et la région forestière²⁶. Par conséquent, chaque arbre levé en forêt possède un poids statistique au sein de la placette et une surface d'extension est attribuée à chaque point d'inventaire. L'IFN calcule alors le volume de chaque arbre et une intégration pondérée permet d'obtenir le volume de bois fort au niveau du domaine d'étude considéré. Ainsi, les données arbres et peuplements peuvent être ventilées sans dérive statistique au niveau des régions forestières départementales pour les cycles 2, 3 et 4 d'inventaire. Rappelons que les contours des 3 massifs PEFC en Aquitaine correspondent aux regroupements de certaines régions forestières.

L'IFN estime les surfaces occupées par les formations boisées ainsi que le volume de bois fort dans les formations boisées de production, c'est à dire les peuplements pour lesquels les conditions d'exploitation sont compatibles avec un intérêt économique. Outre une ventilation par régions forestières départementales, les résultats en volume et en surface peuvent être ventilés par essences, par structures forestières et par classes d'âge et/ou de dimension.

Toutes les formations boisées des 5 départements aquitains ont été inventoriées au moins 3 fois et les 3 départements qu'occupe le massif landais 4 fois. Les 4^{èmes} inventaires des départements 33 et 40 ont eu lieu avant la tempête de décembre 1999 (respectivement en 1998 et 1999), celui du 47 en 2000. Dans les 2 premiers départements, le retour courant 2000 des équipes de l'IFN sur les placettes levées avant tempête a permis d'estimer le volume de bois indemne. Le volume de chablis a quant à lui été relevé lors de l'inventaire du 47. On dispose ainsi sur le massif landais du volume de bois fort sur pied avant et après tempête par points d'inventaire et par régions forestières départementales.

²⁶ Les régions forestières sont définies par des critères d'homogénéité des conditions écologiques, on en dénombre 309 en France. Chacune d'elles se subdivise en régions forestières départementales.

2.3.2. *Eléments de réflexion pour le choix des coefficients de calcul*

L'option partant du volume de bois fort consiste à utiliser des modèles pour estimer successivement le volume du tronc puis le volume total de l'arbre. Alors que l'estimation du volume ou de la biomasse du tronc est relativement précise, la biomasse des autres compartiments (branches, racines) est estimée de manière empirique en appliquant des facteurs d'expansion et des valeurs moyennes d'infradensité du bois.

A l'inverse, **la méthode par les équations au niveau arbre semble a priori plus précise** puisqu'elle permet d'éviter les erreurs liées au cubage et à l'emploi des facteurs d'expansion branche. L'opération de traitement est cependant longue pour l'évaluateur qui, de surcroît, doit avoir accès aux estimateurs statistiques de l'IFN.

Selon l'IPCC (2003) le calcul des stocks de C par l'une ou l'autre des 2 méthodes est synonyme de bonne pratique. Toutefois, pour les pays souhaitant rapporter à l'UNFCCC avec la meilleure précision, il est recommandé de mettre en œuvre l'approche par les équations au niveau arbre. Dans ce cas l'IPCC recommande également d'utiliser des jeux de coefficients spécifiques nationaux.

Il est toutefois rare que toutes les essences dans une région disposent de leurs coefficients spécifiques. En effet, la construction de relations à cette échelle suppose des échantillons de mesure suffisamment nombreux et représentatifs de la ressource locale. De plus il ne semble pas satisfaisant, sans études complémentaires, d'extrapoler à d'autres territoires des relations spécifiques construites dans une région. Il est par exemple peu probable que des coefficients bâtis sur des pins maritimes landais s'appliquent directement aux pins maritimes corses.

Dans ce cas il est opportun de construire des facteurs d'expansion et des équations génériques pour l'essence Pin maritime ou même pour l'ensemble des conifères au niveau national. Construits à partir d'une analyse bibliographique pour des conditions homogènes, ces coefficients permettent d'évaluer le stock de C des forêts à l'échelle souhaitée alors qu'on ne dispose pas d'un nombre suffisant d'échantillons de mesure pour établir des coefficients valides pour la région considérée.

Ainsi l'IPCC propose dans son guide des bonnes pratiques un jeu de coefficients multiplicateurs standard par types climatiques planétaires et par groupes d'essences.

L'hétérogénéité des milieux, des localisations géographiques, des essences, des âges et des pratiques sylvicoles (IPCC, 2003) conduit à une grande multiplicité dans les jeux de coefficients disponibles. Les coefficients évoluent également dans le temps en raison (i) des modifications du climat qui affectent la forme des arbres ou leur proportion de branches et surtout (ii) des pratiques sylvicoles et notamment de la densité de plantation (Dupouey, 2001). Le centre de recherche de la Commission Européenne d'Ispra a mis en avant cette grande diversité dans une étude comparative (Löwe, 2000) à l'échelle de l'UE. En France aussi on recense un grand nombre de coefficients multiplicateurs. Aucune des 4 évaluations des stocks de C des forêts françaises publiées à ce jour n'ont été réalisées avec les mêmes coefficients (Carbofor, 2004).

Il apparaît alors que la définition d'une méthode optimale de calcul des stocks de C dans la biomasse des arbres varie en fonction (i) de l'échelle géographique considérée et des données d'entrée disponibles à cette échelle, (ii) du niveau de précision que se fixe l'évaluateur.

Nous avons retenu 2 jeux de coefficients en Aquitaine, l'un spécifique (pin maritime de futaie régulière sur le massif landais) et l'autre générique (issu du projet de recherche CARBOFOR en 2004). Il s'agit des coefficients les plus récents.

2.3.3. Les jeux de coefficients spécifiques au pin maritime landais

- Les équations au niveau arbre

Les chercheurs de l'INRA de Bordeaux Pierroton mesurent la biomasse aérienne des pins maritimes en futaie régulière sur le massif landais depuis les années 1960. Porté a publié en 1999 et 2002 des **relations allométriques au niveau arbre qui permettent de modéliser la biomasse de chacun des compartiments aériens vivants en fonction de l'âge et du diamètre à 1,30 m de l'arbre**. Le jeu de données disponible en 2004 compte 102 individus provenant de 4 parcelles girondines en lande humide et réparties en 5 classes d'âges : 5, 9, 27, 32 et 53 ans. L'échantillon est important compte tenu de la lourdeur des chantiers de biomasse.

A la demande de l'IFN, ces relations ont été ajustées dans le cadre du projet CARBOFOR. Il s'agissait de fournir une équation donnant la biomasse aérienne totale de chaque arbre en fonction des paramètres levés par l'IFN. Une fonction puissance a été produite avec le DHP comme seule variable d'entrée (annexe 5). En effet, l'IFN n'estime pas l'âge des arbres avec la précision nécessaire.

- Les facteurs d'expansion de biomasse

A partir d'une analyse bibliographique, l'INRA de Pierroton a procédé à l'ajustement des coefficients multiplicateurs pour le pin maritime landais en futaie régulière (Chantal, 2001). Les ajustements proposés sont donc fonctions de l'essence, de l'âge, de la localisation géographique et de la sylviculture. Ils ont été conçus pour une utilisation à partir du volume de bois fort de l'IFN ventilé par classes d'âge.

Le facteur d'expansion de biomasse totale s'entend ici comme le rapport entre la biomasse de l'arbre entier (partie aérienne, aiguilles comprises + partie racinaire) et la biomasse du tronc (bois + écorce).

Pour la partie aérienne, le facteur d'expansion a été ajusté sur la base des relations allométriques au niveau arbre de Porté (1999) avec l'âge et le DHP en variables d'entrée. La chronoséquence comprenait à cette date des pins âgés de 5 à 27 ans. Les équations ne tiennent pas compte de la découpe 7 cm et l'emploi du facteur d'expansion sur le volume de bois fort de l'IFN revient alors à sous-estimer légèrement le stock de C, principalement dans les classes d'âge les plus jeunes où les arbres sont les plus élancés. Néanmoins, ces peuplements ne contribuent que marginalement au volume total sur pied et donc au stock de C dans une région.

Pour la partie racinaire, Porté (1999) considère que compte tenu des connaissances disponibles elle est égale à 30% de la biomasse aérienne totale. Le ratio biomasse aérienne totale / biomasse racinaire (facteur d'expansion racine) vaut alors 1,3.

Jusqu'à 27 ans le modèle développé est une équation non linéaire avec l'âge moyen de la classe en variable d'entrée (annexe 6). A partir de 28 ans, faute de données régionales, le facteur d'expansion est fixé à 1,6. Il s'agit de la valeur moyenne appliquée aux conifères par le CITEPA. Le facteur d'expansion s'applique au niveau peuplement, c'est-à-dire au volume de bois fort ventilé par régions forestières.

- L'infradensité et la teneur en carbone du bois

La bibliographie régionale réalisée par l'INRA a permis d'établir une fonction exponentielle donnant l'infradensité du bois en fonction de l'âge pour des pins âgés de 10 à 70 ans. Des réserves peuvent être émises sur la validité de cette équation car elle repose sur un faible nombre de mesures. L'INRA a toutefois décidé de l'appliquer en considérant qu'elle intègre des données spécifiques au pin maritime landais. Au-delà de 70 ans, nous avons fixé la densité à 0,51 tMS/m³ (valeur donnée par l'équation à 70 ans) puisque à partir de cet âge, la proportion de bois juvénile par rapport au bois final se stabilise (Courtade, 2004), et Chantre (2002) a montré que ce rapport est corrélé à la densité du bois.

Quant à la teneur en C du bois, elle est fixée à 0,5 tC/tMS indépendamment de l'âge du peuplement et en accord avec la valeur utilisée par le CITEPA et recommandée par l'IPCC. Des travaux récents montrent cependant qu'elle est sous-estimée pour des arbres ayant une proportion importante de bois de réaction (Courtade, 2004).

Bien que les incertitudes autour des valeurs des 2 derniers coefficients soient relativement importantes, nous avons considéré qu'ils intégraient le mieux les connaissances disponibles pour l'évaluation des stocks de C dans les pins de futaie régulière sur le massif landais.

On dispose finalement de 2 jeux de coefficients spécifiques pour le pin maritime landais. **Ils diffèrent dans l'évaluation de la biomasse aérienne totale.**

2.3.4. Les coefficients génériques « conifères et feuillus France »

Dans le cadre du projet CARBOFOR, l'IFN et le LERFOB²⁷ ont proposé une actualisation des coefficients nationaux pour le calcul des stocks de C dans la biomasse ligneuse à partir des données de l'IFN.

Sur la base du guide des bonnes pratiques de l'IPCC, l'objectif était de développer des coefficients de calcul basés (i) pour la partie aérienne sur des équations de cubage au niveau arbre avec les variables de l'IFN en entrée, et (ii) pour les autres coefficients (facteur d'expansion racinaire, infradensité du bois et teneur en C du bois) sur une analyse de la littérature internationale (Carbofor, 2004).

Des tarifs de cubage du volume aérien ligneux total au niveau de l'arbre (feuilles exclues) ont été publiés pour 7 groupes d'essences représentant 60% du volume sur pied au niveau national (IFN). Les tarifs sont génériques dans leur ossature mais des coefficients spécifiques sont attribués à chaque groupe d'essences (annexe 7). Ils intègrent un facteur de forme. Leur application requière la hauteur totale et la circonférence à 1,30 m, données levées en forêt par l'IFN.

Des facteurs d'expansion branches (ratio volume aérien ligneux total / volume de bois fort) ont été construits à partir des tarifs de cubage pour les groupes d'essences regroupés « conifères » et « feuillus » (annexe 8). Leur valeur est constante et la biomasse des feuilles n'est pas prise en compte. En effet leur relation à la biomasse aérienne ligneuse n'est pas linéaire et leur intégration dans des facteurs d'expansion

²⁷ LERFOB : Laboratoire d'Etudes sur les Ressources Forêt et Bois – INRA Nancy

constants n'est pas conseillée (Carbofor 2004). Par ces 2 aspects, les facteurs d'expansion CARBOFOR s'inscrivent dans la logique de ceux utilisés par le CITEPA. Un ratio global (en tC/m³ de bois fort) a été calculé. Le ratio pour les feuillus est très supérieur à celui des conifères (0,535 contre 0,361), du fait d'une densité du bois et d'une branchaison plus importante par unité de volume de tronc pour les feuillus.

Les coefficients CARBOFOR ne s'appliquent pas aux peupleraies cultivées qui présentent une dynamique d'accroissement de la biomasse ligneuse exceptionnelle pour des essences feuillues. Des coefficients spécifiques sont attendus.

La représentativité de l'échantillon du LERFOB est imparfaite (i) au niveau des essences (seuls les hêtres et les chênes sessiles ont été traités pour les feuillus), des (ii) structures et de la localisation géographique (il s'agit d'arbres de futaie régulière principalement situés dans l'Est de la France) et (iii) les données soient déjà anciennes (archives de la recherche datant de 1920-1955). **Toutefois, des tests de validité ont permis de conclure au caractère relativement robuste des relations et des facteurs d'expansion branche proposés à l'issue de CARBOFOR.** Les résultats des tests de validité sont largement commentés dans le rapport final CARBOFOR.

2.4. Méthodes pour le choix des coefficients de conversion les plus adaptés

2.4.1. Choix du jeu de coefficients spécifiques pour le pin maritime

Afin de retenir le jeu de coefficients spécifiques le plus robuste pour le calcul des stocks de C dans la biomasse des pins maritimes, nous avons comparé 2 à 2 les résultats issus (i) de l'équation de biomasse aérienne et (ii) du facteur d'expansion de biomasse totale. La méthode est détaillée dans la figure 2.

Dans les 2 cas, ce sont les données extraites du 4^{ème} inventaire du département des Landes qui ont été utilisées. L'étude a porté plus précisément sur une région forestière départementale pilote. Il s'agit de la région « plateau landais 4 », qui comprend les communes de Sabres, Biscarosse et Mimizan. Elle est jugée représentative du massif des Landes de Gascogne avec un taux de boisement de 74%, une surface boisée de production estimée par l'IFN à près de 132.000 ha et un volume de pin maritime voisin de 20 millions de m³ en 1999.

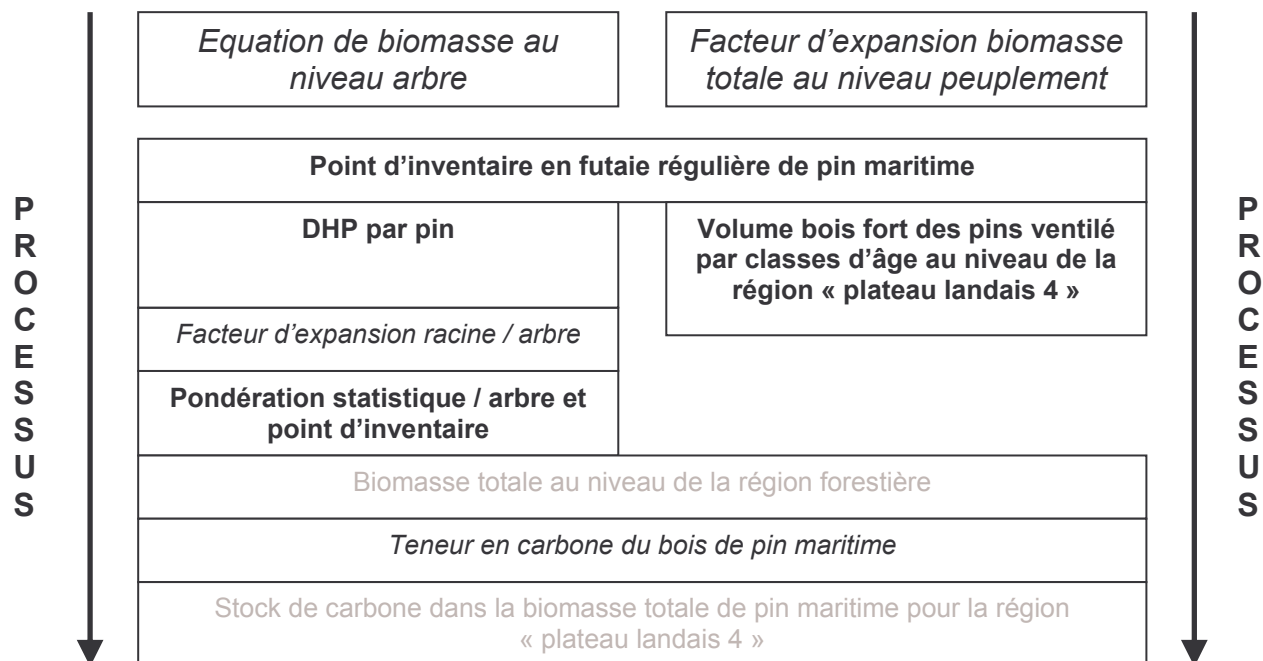


Figure 2 : Schéma opérationnel pour le calcul comparé de la biomasse totale de pin maritime
En gras les données IFN ; *En italique les données fournies par la recherche* ; **En gris les variables calculées**

2.4.2. Comparaison des coefficients spécifiques et génériques pour les pins

A partir des données d'inventaire disponibles à l'échelle du massif landais nous avons comparé les stocks de C dans la biomasse de pin maritime en futaie régulière calculés (i) par les coefficients spécifiques, et (ii) par les coefficients génériques « conifères » issus du projet de recherche CARBOFOR.

L'objectif est d'évaluer l'impact de l'emploi des coefficients génériques sur le renseignement du niveau de stock dans la biomasse arborée. Il s'agit également de présenter les motivations qui conduisent à l'emploi de l'une ou de l'autre approche.

2.5. Méthodes pour le calcul des stocks et flux de carbone en Aquitaine

Des méthodes spécifiques de calcul ont été développées pour chaque niveau géographique (3 massifs PEFC, région administrative Aquitaine et zone atelier de Pontenx) en fonction des données d'inventaire disponibles.

2.5.1. Massif des Landes de Gascogne

En 2004, les gestionnaires et les industriels du massif landais disposent de 4 inventaires de leur ressource ainsi que d'une évaluation précise des surfaces et des volumes touchés par la tempête de décembre 1999. De plus, à chaque cycle l'IFN inventorie successivement les 3 départements qui composent le massif landais, permettant la fourniture rapide d'une information instantanée à l'échelle du massif. Les résultats du 3^{ème} cycle d'inventaire sur le massif correspondent à l'année moyenne 1988, ceux du 4^{ème} à 1999, avec une actualisation en 2000 du volume sur pied. L'évaluation des stocks de C dans la biomasse a porté sur ces 3 dates.

Les stocks de C dans la biomasse des pins maritimes en futaie régulière ont été évalués dans les 13 régions forestières départementales que compte le massif à partir des coefficients spécifiques développés par l'INRA de Pierroton. Les coefficients CARBOFOR ont permis quant à eux de calculer les stocks de C dans la biomasse ligneuse de toutes les essences (conifères et feuillues) présentes dans toutes les structures forestières.

Finalement des cartes des stocks de C par ha et par régions forestières sont éditées pour les calculs issus des coefficients « pin maritime » et « CARBOFOR ».

Que ce soit à l'échelle des régions forestières départementales ou du massif landais, il n'est pas conseillé de calculer un stock de C en sommant (i) les résultats issus des coefficients spécifiques aux pins maritimes et (ii) les résultats issus des coefficients génériques CARBOFOR pour tous les autres arbres. En effet, les 2 jeux de coefficients sont construits de manière différente et les stocks de C qu'ils renseignent ne concernent pas strictement les mêmes compartiments de biomasse (coefficients spécifiques = biomasse totale ; coefficients génériques = biomasse ligneuse).

L'évaluation des flux de C dans la biomasse a été réalisée par comparaison des stocks sur pied aux 3 dates disponibles. Ainsi nous avons pu estimer (i) le stockage moyen de C pour un fonctionnement « normal » du massif et (ii) l'impact d'un évènement climatique exceptionnel sur le bilan de C dans la biomasse du massif.

2.5.2. Massifs Dordogne-Garonne et Adour-Pyrénées

Ces 2 massifs sont constitués de départements ne disposant pas du même nombre d'inventaire. Ainsi, sur le massif Dordogne-Garonne, les derniers résultats de Dordogne ont été levés au 3^{ème} cycle (1992) alors que les départements de la Gironde (1998) et du Lot-et-Garonne (2000) ont été inventoriés 4 fois.

Dans l'objectif de proposer une méthode qui permette une actualisation rapide des stocks de C à la fourniture de nouvelles données départementales, nous avons opté pour une approche par cycles d'inventaires. C'est à dire que nous n'avons considéré que les résultats des inventaires 2 et 3 pour chaque département, indépendamment du fait que certains départements disposent de données plus récentes. On calcule ainsi l'année moyenne des inventaires 2 et 3 pour chaque massif (tableau 4).

Bien que cette méthode conduise à exprimer de manière imprécise le stock de C à l'instant t , elle est satisfaisante pour l'évaluation du stockage par la méthode de la variation des stocks sur pied entre les 2 années moyennes d'inventaires.

Massif PEFC	Inventaire 2	Inventaire 3
Dordogne Garonne	1979 (1977-1982)	1989 (1987-1992)
Adour Pyrénées	1982 (1978-1985)	1992 (1988-1995)

Tableau 4 : années moyennes d'inventaires. Entre parenthèses : écart max entre inventaires par dpt.

Les jeux de coefficients pour le pin maritime n'ont pas été utilisés ici car nous nous trouvons en dehors du domaine géographique sur lequel ils sont bâtis. Ce sont donc les coefficients CARBOFOR appliqués au volume de bois fort qui ont permis de calculer les stocks de C dans la biomasse ligneuse. Les résultats sont ventilés par groupes d'essences et par structures forestières.

Enfin, les stocks de C par hectare calculés sur chacun des 2 massifs PEFC ont été cartographiés au niveau des régions forestières.

La comparaison des stocks de C sur pied calculés aux inventaires 2 et 3 renseigne sur l'ampleur du stockage moyen de C dans la biomasse ligneuse pour un fonctionnement « normal » des 2 massifs, c'est à dire en dehors d'accidents climatiques exceptionnels.

Une actualisation du volume sur pied avant tempête et du volume de chablis dans les forêts de Dordogne a été réalisée en 2002. Il est possible avec les résultats du 4^{ème} inventaire après tempête de Gironde et du Lot-et-Garonne d'estimer les conséquences de la tempête sur le stockage de C du massif Dordogne-Garonne.

2.5.3. Région administrative Aquitaine

Le principal enjeu associé à l'évaluation des stocks et des flux de C à l'échelle d'une région administrative est d'ordre politique, c'est à dire qu'il intéresse les administrations régionales qui souhaitent rapporter de leur contribution au stockage de C dans le cadre national. En effet, pour des enjeux relatifs à la gestion des stocks en forêt, ce sont les approches opérationnelles par massifs forestiers homogènes qui se révèlent pertinentes.

Les résultats des 3^{èmes} inventaires réalisés dans chacun des 5 départements aquitains ont été agrégés. L'année d'inventaire moyen est alors 1990, année de référence pour le protocole de Kyoto. En pratique les 5 inventaires aquitains concernés ont été réalisés entre 1987 et 1995. Nous avons choisi de ne pas procéder à l'actualisation de ces données car cette opération se révèle être particulièrement délicate en Dordogne et dans les Pyrénées-Atlantiques, départements marqués par une forte diversité des milieux naturels, des types de peuplements et des modes de gestion. La part d'erreur engendrée par les calculs d'actualisation n'aurait pu être dissociée de celle liée à la méthode de calcul des stocks de C.

Les coefficients CARBOFOR ont été retenus pour le calcul des stocks de C dans la biomasse ligneuse. Ils se rapprochent le plus de ceux utilisés par le CITEPA. Une carte des stocks de C à l'hectare par régions forestières est proposée.

Du fait de la démarche suivie, les flux de C à l'échelle de la région administrative seront évalués lors de la fourniture des résultats du 4^{ème} inventaire de Dordogne et des Pyrénées-Atlantiques.

2.5.4. Zone atelier de Pontenx

L'évaluation des stocks et des variations de stocks de C dans la biomasse ligneuse à l'échelle de la zone atelier de Pontenx intéresse directement certains partenaires du projet FORSEE, notamment ceux travaillant sur les fonctions socio-économiques des forêts (critère 6). Connaissant le prix de la tonne de C séquestrée sur le futur marché d'échange, il est alors possible d'évaluer la valeur monétaire de la fonction de stockage par les forêts de la région.

Le traitement cartographique auquel ont été soumises les données d'inventaire nous a permis d'extraire le volume de bois fort (i) mesuré lors du 4^{ème} inventaire du département des Landes et (ii) ventilé par essences et par classes d'âge pour le pin maritime (annexe 2).

Nous avons appliqué les coefficients CARBOFOR sur le volume de bois fort pour évaluer le stock de C dans la biomasse de toutes les essences présentes sur la zone de Pontenx. Les stocks de C dans la biomasse des pins maritimes de futaie régulière ont également été calculés. Ces derniers résultats sont ventilés par classes d'âge.

Aucune représentation cartographiée n'est proposée. En effet, la méthode d'extraction des données dendrométriques au niveau de la zone atelier de Pontenx ne permet pas d'associer un volume avec les domaines cartographiés par l'IFN.

L'estimation des flux de C par la méthode de la variation du stock sur pied n'a pas pu être réalisée à l'échelle de la zone atelier, les données d'inventaire n'étant disponibles que pour l'année 1999. Quant à l'estimation par la méthode des bilans, elle serait envisageable à condition d'estimer avec une précision suffisante les flux de bois sortants de la zone.

2.6. Résultats

2.6.1. Coefficients spécifiques robustes pour le calcul de la biomasse

En 1999, l'IFN estime le volume de bois fort de pin maritime en futaie régulière à 20,46 Mm³ pour la région « Plateau Landais 4 ». Cette valeur, ventilée par classes d'âge, provient de mesures sur 3300 arbres inventoriés dans 315 placettes.

A cette échelle, la quantité de biomasse aérienne totale calculée par l'équation pin maritime ajustée à une entrée (DHP) est de 8,55 Mt MS. Quant au facteur d'expansion spécifique au pin maritime, il l'évalue à 11,43 Mt MS.

Pour évaluer la fiabilité de chaque approche de calcul, il est nécessaire à ce stade de revenir sur leurs modes de construction respectifs.

Tous 2 sont issus des équations allométriques au niveau arbre publiées par Porté entre 1999 et 2002 et ayant pour variables d'entrée l'âge et le DHP.

L'équation de biomasse à une entrée a été ajustée (Carbofor, 2004) à la demande de l'IFN pour permettre une utilisation directe à partir des variables levées lors des inventaires. L'IFN n'estimant pas l'âge des arbres avec une précision suffisante, l'ajustement linéaire de la biomasse aérienne a porté sur le DHP.

La relation mesurée sur les arbres échantillons entre la biomasse aérienne totale et le DHP montre (i) une dispersion croissante de la biomasse avec l'augmentation du DHP et (ii) une sous-estimation systématique de la biomasse par le modèle linéaire pour les arbres de DHP inférieur à 30 cm. Pour sa part, le modèle qui intègre l'âge estime mieux la biomasse pour les individus de DHP moyen et il reproduit la dispersion observée avec l'accroissement de diamètre. Il ressort que l'âge est une variable explicative prépondérante du modèle de Porté. Il permet en effet d'intégrer les effets liés aux différents niveaux de fertilité entre les placettes. **L'équation à 2 entrées (âge et DHP) est par conséquent meilleure que celle à 1 entrée (DHP).**

Quant au facteur d'expansion, il est dérivé de la relation avec l'âge. On peut donc en conclure que c'est l'équation de biomasse sous sa forme ajustée à 1 variable d'entrée qui conduit à sous-estimer le stock de biomasse.

Finalement, nous retenons la méthode de calcul par le facteur d'expansion dépendant de l'âge pour évaluer le stock de C dans les pins en futaie régulière.

Toutefois, l'estimation de la biomasse par des relations au niveau arbre demeure en théorie plus précise puisqu'elle permet d'éviter certaines erreurs liées (i) au cubage de l'arbre, (ii) aux erreurs liées à la modélisation du facteur d'expansion et (iii) à la répartition du volume de bois fort par classes d'âge.

Pour poursuivre dans cette approche il est indispensable de rechercher les modèles qui ont pour seules variables explicatives les données levées par l'IFN.

2.6.2. Emploi des coefficients Carbofor sur le stock de carbone dans les pins

A l'inverse des coefficients spécifiques au pin maritime landais, les coefficients « conifères » issus du projet CARBOFOR sont (i) applicables à l'échelle de la France métropolitaine, (ii) non spécifiques, (iii) non dépendants de l'âge, (iv) applicables à toutes les structures forestières. Enfin, les stocks de C calculés par les coefficients CARBOFOR concernent la biomasse ligneuse (feuilles non incluses).

L'objectif est d'estimer la différence induite par l'emploi des coefficients génériques CARBOFOR sur le stock de C dans la biomasse totale des pins évalué avec les coefficients spécifiques dont le domaine de validité est le massif landais.

Les 2 jeux de coefficients ont été appliqués au volume de bois fort de pin maritime en futaie régulière mesuré à l'échelle du massif landais lors des 3^{èmes} et 4^{èmes} cycles d'inventaires (respectivement années moyennes 1988 et 1999).

Il est possible de comparer les résultats issus des 2 jeux de coefficients en intégrant aux résultats CARBOFOR le stock de C dans la biomasse foliaire (tableau 5). Sur la base des travaux de Cannell (1982), Dupouey estime que la biomasse des aiguilles dans des peuplements résineux en France représente 7,8 tMS/ha (Carbofor, 2004).

INVENTAIRES	STOCKS DE CARBONE BIOMASSE ARBOREE (MtC)		Coeff. conifères France / Coeff. pin maritime
	coefficients pin maritime	coefficients conifères France	
3	45,08	47,87	+5,8%
4	48,93	51,75	+5,4%

Tableau 5 : impact de l'emploi des coefficients génériques sur le stock de C dans la biomasse arborée

L'emploi des coefficients génériques « conifères France » pour le calcul du stock de C dans la biomasse totale de pin maritime en futaie régulière conduit à surestimer de plus de 5% la valeur obtenue avec les coefficients spécifiques.

Les 2 jeux de coefficients sont dissemblables : arbres échantillons, équations au niveau arbre, facteurs d'expansion, infradensité et teneur en C du bois. Si l'incertitude associée aux relations spécifiques pin maritime (facteur d'expansion et infradensité du bois) a fait l'objet d'une estimation partielle en 2001, celle qui accompagne les coefficients CARBOFOR mérite d'être quantifiée. Par conséquent, l'analyse comparée des 2 jeux de coefficients n'est pas poussée d'avantage. **Nous retenons l'hypothèse que les coefficients spécifiques sont plus précis pour le calcul des stocks de C dans la biomasse des pins en futaie régulière.**

Les stocks de C calculés à partir des coefficients CARBOFOR concerneront la seule biomasse ligneuse. En effet, le format des coefficients CARBOFOR pour le calcul de la biomasse foliaire par ha n'est pas satisfaisant pour les structures en mélange. Or celles-ci sont fréquentes en Dordogne-Garonne et Adour-Pyrénées.

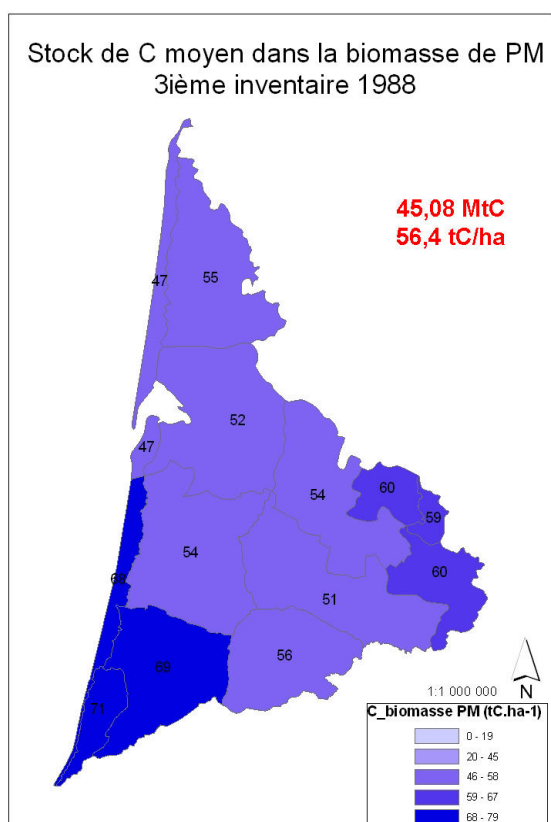
2.6.3. Stocks et flux de carbone sur le massif des Landes de Gascogne

- Futaie régulière de pin maritime (coefficients spécifiques pin maritime)

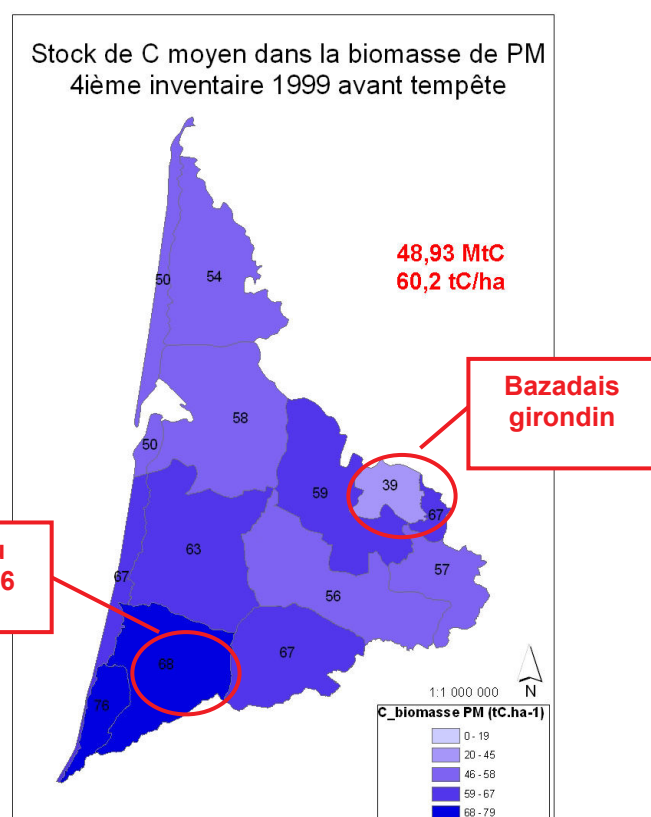
Entre 1988 et 1999 avant la tempête, la futaie régulière de pin maritime a constitué un puits de C de l'ordre de +0,35 MtC/an en moyenne. Ce flux correspond à un accroissement moyen de +0,8% par an du stock de C de 1988.

Le stockage additionnel de C sur le massif s'explique (i) par l'augmentation sur la période de 9570 ha de la surface des futaies régulières de pin maritime, et (ii) par un accroissement du stock de C moyen à l'ha de +0,7% par an en moyenne en lien avec la hausse du volume à l'ha mesuré par l'IFN sur le massif.

L'analyse par régions forestières permet de dessiner un gradient Nord-Sud pour les stocks et les flux de C à l'ha (cartes 3 et 4).



Carte 3 : stock de C à l'ha en 1988



Carte 4 : stock de C à l'ha en 1999

En 1988, les stocks de C à l'ha les plus importants se situent au sud du massif. Deux facteurs contribuent à expliquer cette tendance. D'abord, (i) la sylviculture pratiquée dans cette région est en moyenne plus patrimoniale que sur l'ensemble du massif. Ainsi 39% du volume total sur pied dans la région Plateau landais 6 se rencontre dans les peuplements âgés de plus de 50 ans alors que la moyenne sur le massif est de 29%. Ensuite, (ii) les mesures de l'IFN montrent une meilleure productivité moyenne à l'ha des stations situées au sud du massif.

L'évolution des stocks de C à l'ha par régions forestières entre 1988 et 1999 montre d'importantes disparités régionales. L'accroissement du stock à l'ha dans les régions du centre est plus fort que dans celles du nord.

Outre des conséquences variables des changements climatiques sur la productivité des pins entre les grandes régions du massif (Pluviaud 2000, Loustau 2001 et Cloppet 2002), on peut signaler que chaque année le Médoc est d'avantage frappé par les feux de forêt que les autres régions.

L'étude du flux de C au niveau de la région Bazadais en Gironde souligne le rôle prépondérant des choix sylvicoles et de l'équilibre des classes d'âge sur le niveau de stockage de C d'un massif. Alors que la surface en futaie régulière de pin maritime augmente de +34% entre 1987 et 1998, l'exploitation des peuplements les plus âgés et la prise en compte des stocks de C dans les peuplements nouvellement recensés fait chuter de près de 30% le stock de C moyen à l'hectare.

Les conséquences de la tempête de décembre 1999 ont été dramatiques pour les stocks de C dans la futaie régulière de pin maritime landaise. Elle a entraîné la libération de 7,57 MtC, soit 15,7% du stock sur pied avant tempête (carte 5).

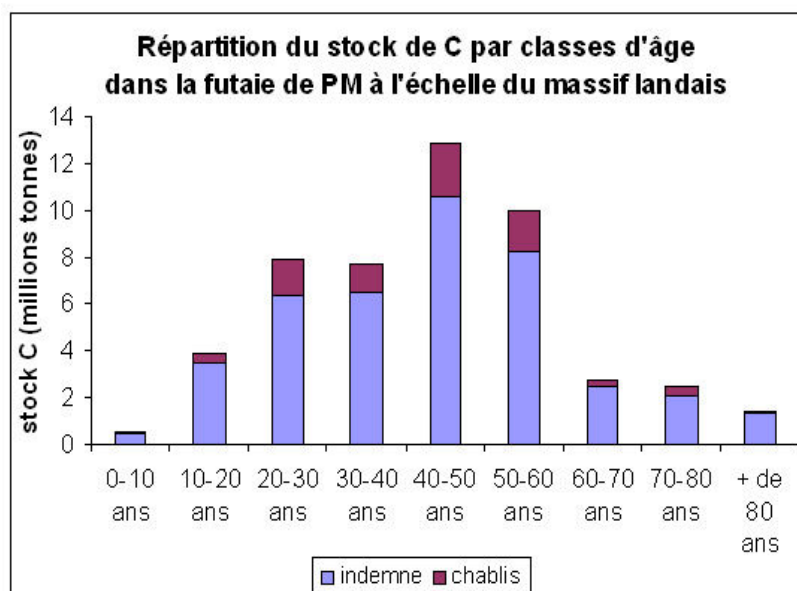
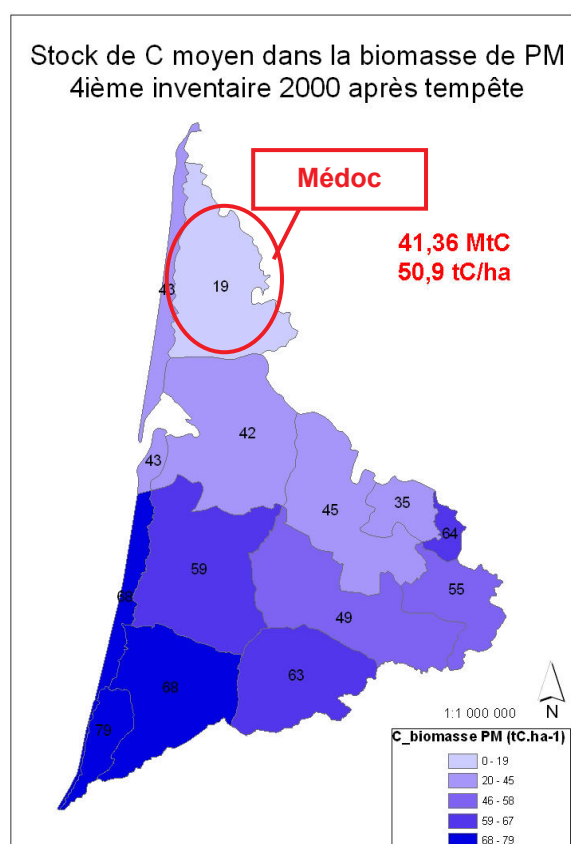


Figure 3 : impacts de la tempête sur les stocks de C ventilés par classes d'âge

Carte 5 : stock de C à l'ha après la tempête

Sur la période 1988-2000, le bilan de C de la futaie régulière de pin maritime est négatif de l'ordre de 3,72 MtC, soit une diminution de 8,3% du stock sur pied. Le stock de C sur le massif n'est plus que de 41,36 MtC en 2000 contre 45,08 MtC en 1988. Le stock de C moyen à l'ha est de 50,9 tC/ha en 2000, soit 9,8% de moins que celui calculé en 1988. Par conséquent, sur la période 1988-2000 la futaie de pin maritime est une source de C de l'ordre de 0,34 MtC/an en moyenne pour la biomasse des arbres. Le caractère de source doit cependant être relativisé puisque les résultats de l'évaluation des flux sur la période 1988 et 2000 prennent en compte les conséquences d'un événement climatique exceptionnel dont la fréquence de retour dépasse a priori la période considérée.

L'ampleur du déstockage est considérable dans les régions du nord du massif. C'est le cas des peuplements du Médoc qui ont décapitalisé 65% de leur stock de C à l'ha par rapport à 1988. Ainsi, la tempête a contribué à renforcer la différence nord-sud observée sur le massif pour les stocks de C à l'ha dans la biomasse arborée.

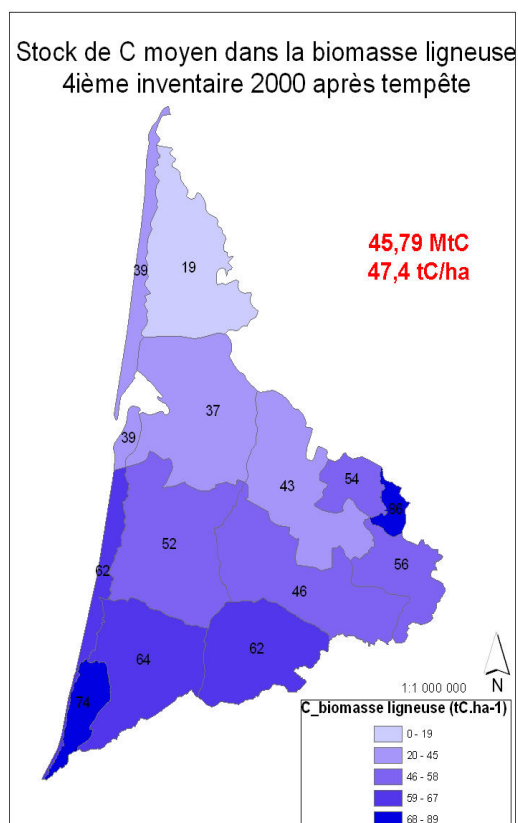
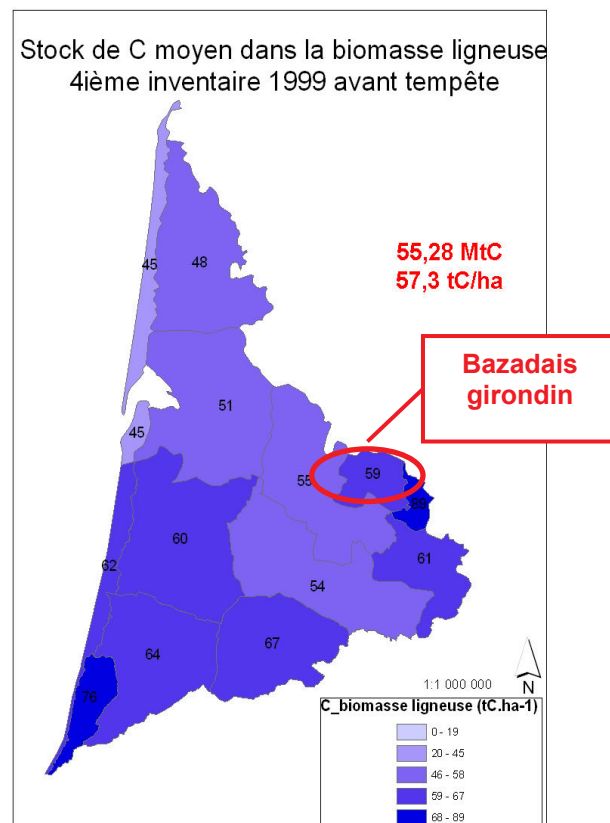
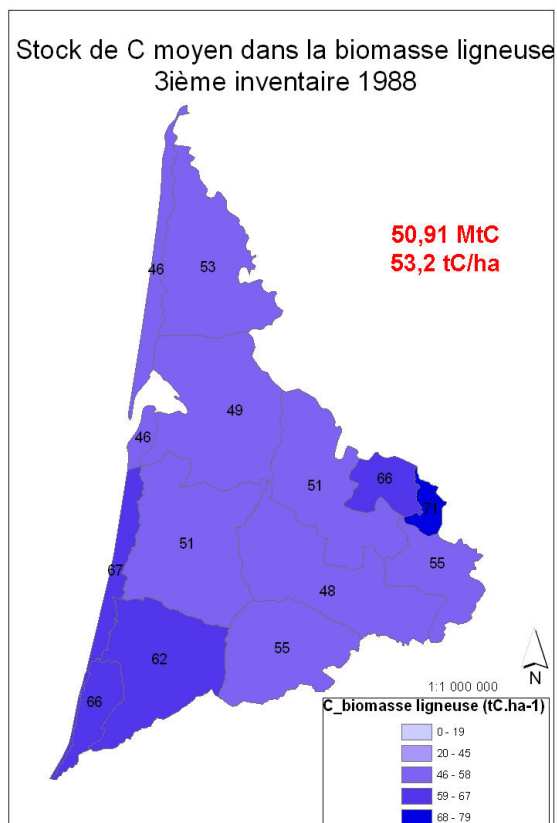
Sur l'ensemble du massif, les classes d'âge les plus touchées sont comprises entre 20 et 60 ans (figure 3) ; or ces peuplements présentent le taux de croissance, et donc de fixation de CO₂ atmosphérique, le plus élevé. Par conséquent, la vitesse de reconstitution du stock de C dans la biomasse arborée de la futaie régulière de pin maritime dépendra (i) de la vitesse du reboisement des peuplements ravagés, (ii) du rythme d'exploitation des peuplements moins sévèrement touchés au cours des quelques années qui suivent la tempête (leur exploitation devrait contribuer à faire chuter le niveau de stock à l'ha) et (iii) des orientations sylvicoles qui seront mises en œuvre dans le futur sur le massif.

- Stocks et flux de C pour toutes les essences (coefficients CARBOFOR)

A l'instar de la tendance observée dans la futaie régulière de pin maritime, **les forêts du massif landais ont constitué un puits de C moyen de l'ordre de + 0,4 MtC/an sur la période comprise entre 1988 (stock de 53,2 MtC) et 1999 (stock de 55,28 MtC).** Ce stockage correspond à un accroissement moyen annuel de +0,8%. Enfin, le stock de C moyen à l'ha progressait de +0,7% par an et passait de 53,2 tC/ha en 1988 à 57,3 tC/ha en 1999.

Les conifères représentaient 88,2% du stock de C total dans la biomasse ligneuse en 1988 et en 1999. La contribution des feuillus au stock de C de la région est faible (11,8%) mais elle demeure constante.

Les tendances globales et régionales décrites pour la futaie régulière de pin maritime peuvent être reprises pour analyser les cartes 6 à 8, à l'exception du Bazadais girondin. **Ici la prise en compte du stock de C dans les feuillus (65% du stock de C total de la biomasse ligneuse) contribue à limiter la chute du stock de C à l'ha occasionnée par la sylviculture du pin maritime.**



Cartes 6 à 8 : stocks de C dans la
biomasse ligneuse en 1988, 1999 et
2000

La tempête a entraîné le déstockage de 9,49 MtC, soit 17,2% du C séquestré dans les forêts en 1999. Les feuillus ont payé un lourd tribut puisque leur stock a chuté de 1,85 MtC, soit 28% de leur stock de C sur pied avant tempête. En 2000 ils ne représentent plus que 10,2% du stock de C sur le massif.

A l'aide des coefficients CARBOFOR, Pignard a évalué le stock de C moyen à l'ha dans les forêts françaises à 71 tC/ha pour l'année moyenne d'inventaire 1996 (Carbofor, 2004).

Avec 57,3 tC/ha en 1999, la futaie de pins maritimes se situe en deçà de la moyenne nationale. Deux facteurs y contribuent. Premièrement, la sylviculture intensive du pin maritime tend à limiter le volume moyen à l'ha sur le massif. Deuxièmement la part des feuillus dans le volume total de bois sur le massif est faible (7%) contrairement à la moyenne nationale (61%). Or les feuillus stockent plus de C par m³ de bois fort.

Au niveau national, le stockage additionnel de C dans la biomasse ligneuse entre 1984 et 1996 représente un gain moyen annuel de +2%. Par comparaison, l'accroissement calculé sur le massif landais entre 1988 et 1999 est relativement faible avec +0,8% par an. On relève 2 facteurs explicatifs (i) l'augmentation de la surface boisée plus forte de 22% au niveau national par rapport au niveau régional, mais surtout (ii) un niveau de prélèvements correspondant à 63% de la production biologique annuelle au niveau national contre 83% pour le massif landais (PEFC Aquitaine, 2001).

Alors que la dynamique « normale » du massif landais est au stockage dans la biomasse ligneuse, l'intégration des conséquences de la tempête conduit à un bilan de C négatif sur la période 1988-2000 de 5,12 MtC. Cette valeur correspond à une diminution de 10,1% du stock de C sur pied de 1988.

Avec 45,79 MtC séquestrés dans la biomasse en 2000, le massif s'est comporté comme une source de C de 0,47 MtC/an en moyenne sur la période. La tempête a également fait chuter le stock à l'ha de 10,9%. Il est de 47,4 tC/ha en 2000.

Notons toutefois que ces tendances intègrent les conséquences d'un événement climatique a priori peu fréquent sur une période courte de 12 ans.

- Perspectives de stockage de C dans la futaie de pin maritime

En 2001, l'IFN a coordonné des travaux visant à évaluer la ressource de pin maritime disponible suite à la tempête. Les modélisations à l'horizon 2060 doivent permettre aux industriels d'anticiper leurs approvisionnements.

Dans le cadre de cette étude, l'IFN a procédé à la calibration du modèle de croissance du pin maritime de Bernard Lemoine. Il s'agissait principalement d'intégrer les augmentations de productivité sur le massif observées par l'IFN depuis une vingtaine d'années. Le modèle calibré intègre par conséquent des effets liés aux techniques de ligniculture et à l'introduction de matériel génétique amélioré sur la croissance des jeunes peuplements.

Parmi les 3 modélisations proposées à partir du volume de bois sur pied après tempête, la simulation n°6 semble se rapprocher le plus de la réalité.

Les hypothèses retenues sont : (1) une reconstitution « lente » des 91.750 ha de peuplements détruits à plus de 50% (i.e. 15 ans en Gironde et 5 ans dans les Landes et le Lot-et-Garonne), et (2) la mise en œuvre d'une sylviculture de type « classique ». Celle-ci correspond à la moyenne observée par l'IFN entre 1990 et 1999 pour 3 domaines d'études : la forêt privée de la Gironde, la forêt privée des Landes et du Lot-et-Garonne, et l'ensemble de la forêt soumise.

Les scénarios sylvicoles mis en œuvre sont définis par (i) un taux de coupe rase par classes d'âge déterminé par télédétection (moyenne annuelle de la surface observée

par domaines d'études entre 1990 et 1999), et (ii) un taux d'éclaircie par classe d'âge défini comme la moyenne de la surface observée pour chaque domaine d'étude par comparaison d'inventaires.

Les résultats de la simulation ne tiennent pas compte de probables variations au cours de la période de la surface boisée, de pressions abiotiques (maladies, ravageurs, incendies, tempête) et de modifications de la productivité en lien avec (i) le climat, (ii) l'emploi de matériel génétique amélioré et (iii) l'introduction de nouveaux scénarios et techniques sylvicoles.

Ils permettent alors d'évaluer la dynamique d'amortissement des effets de la tempête sur le niveau de production et le stock de bois sur pied du massif.

Des développements ultérieurs permettraient, à partir des outils développés dans l'étude, d'intégrer aux résultats de simulation les conséquences des facteurs de modification de la production ligneuse cités plus haut.

L'IFN estime le volume de bois sur pied avant tempête à 139,42 Mm³. Il chute à 107,68 Mm³ à la fin de l'année 2000 (figure 4), dont 23,15 Mm³ abattus par la tempête et 8,59 Mm³ récoltés par coupe rase sur des parcelles indemnes en Gironde (fin 1998 + 1999 + 2000), Landes (fin 1999 + 2000) et Lot-et-Garonne (2000).

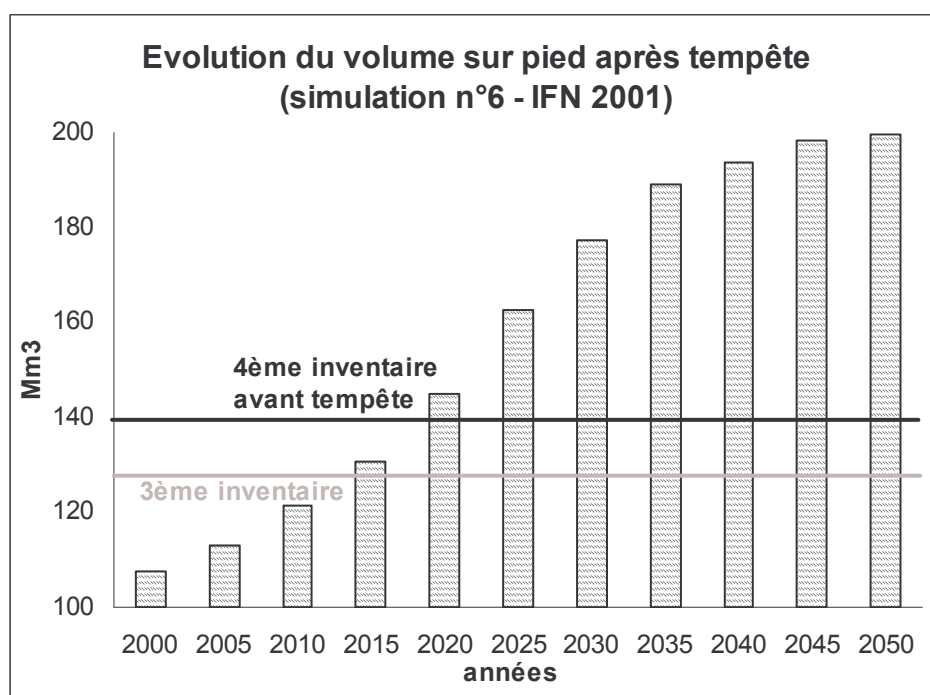


Figure 4 : Evolution du volume de bois sur pied (arbre + de 15 ans) (Simulation n°6 – IFN 2001)

Selon les projections de ressource, le stock de C dans la biomasse ligneuse devrait être maintenu inférieur à celui de 1988 jusqu'en 2014. **La futaie de pin maritime landaise demeure donc une source nette de C sur la période 1988-2014.**

Toutefois à partir de 2015, en raison de prélèvements sur la ressource indemne inférieurs à la production biologique annuelle, le stockage additionnel de C dans la biomasse de (+1,4% en moyenne par an sur la période 2000-2014) permet au massif de redevenir un puits de C sur la période 1988-2015.

Et la dynamique de stockage s'accélère à partir de 2015 (+2,4% par an sur la période 2015-2030) avec l'arrivée dans les classes d'âge qui présentent le niveau d'accroissement le plus soutenu des peuplements reconstitués après tempête. **Finalement le massif retrouve avant 2020 son niveau de puits d'avant tempête.**

Entre 2011 et 2015 (figure 5) le massif retrouve également son niveau de mobilisation de la ressource par coupes rases d'avant tempête, avec environ 7,6 Mm³ hors exploitation des chablis, principalement en raison de dégâts limités dans les départements des Landes et du Lot-et-Garonne qui fournissaient 60% de la récolte de pin maritime du massif landais avant tempête.

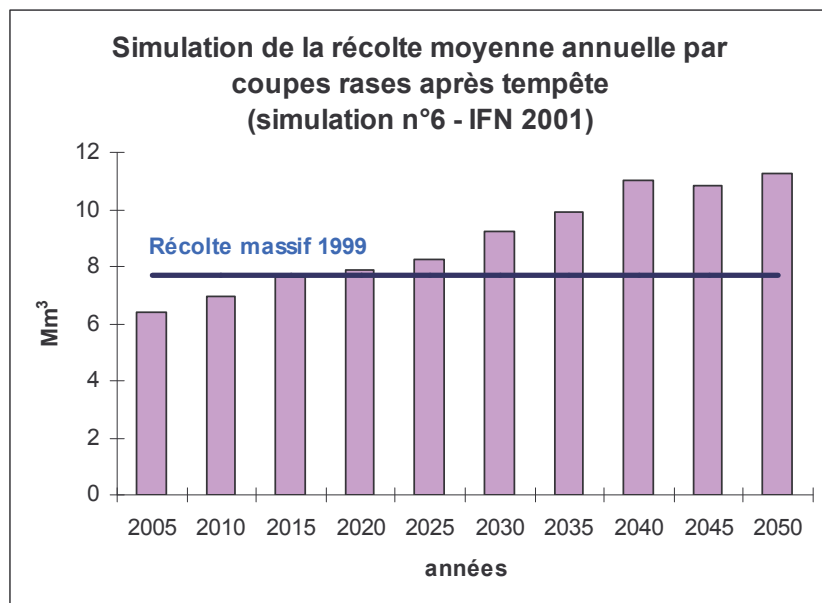


Figure 5 : Evolution de la mobilisation moyenne annuelle par coupe rase (Simulation n°6 – IFN 2001)

Nos résultats montrent que pour une évaluation de fond du caractère de puits ou de source de C d'un massif forestier, l'intégration des conséquences d'un événement climatique exceptionnel dans les bilans de C doit se faire sur un pas de temps suffisamment long pour amortir des tendances ponctuelles.

Finalement, le caractère de puits ou de source de C du massif landais dépend pour partie des orientations stratégiques à long terme des acteurs, (i) au niveau des choix sylvicoles et (ii) de l'évolution de la surface boisée, et (iii) pour partie des modifications du milieu naturel (§ B.4.3). Les résultats des simulations présentées ici ne tiennent pas compte de ces facteurs d'incertitudes et les niveaux de stockage décrits sont certainement sur évalués.

2.6.4. Stocks et flux de carbone sur le massif Dordogne-Garonne

- Résultats sur la période 1979-1989

Entre les années moyennes d'inventaire 1979 et 1989, la biomasse ligneuse des forêts du massif Dordogne-Garonne a constitué un puits de C de 6,15 MtC (+0.62 MtC/an), correspondant à un accroissement de 24% du stock de C sur pied calculé en 1979 (26,16 MtC).

Cette tendance s'explique par 2 facteurs additionnels. D'une part la surface boisée s'est accrue de 32.200 ha sur la période. D'autre part, en passant de 54,8 tC/ha en 1979 à 64 tC/ha en 1989, la quantité de C à l'ha a progressé de 16%. Ce phénomène traduit l'augmentation du volume de bois à l'ha (de 115 à 134 m³/ha)

consécutives au niveau de prélèvements faible sur la ressource évalué à 58% de l'accroissement biologique annuel (PEFC Aquitaine 2001).

Les feuillus apportent une contribution majeure au stock de C total du massif (tableau 6). Celle-ci a légèrement augmenté sur la période 1979-1989 malgré l'enrésinement observé en Dordogne, principal département forestier du massif.

Département / Massif	Année d'inventaire	Stock C biomasse ligneuse (MtC)	Contribution des feuillus	Stock C (tC/ha)
24	1982	19,94	77%	54,5
33	1977	3,34	61%	55,4
47	1979	2,85	87%	54,4
Dordogne-Garonne	1979	26,16	75%	54,8
24	1992	24,13	75%	61,7
33	1987	4,29	64%	71,4
47	1989	3,85	90%	71,4
Dordogne-Garonne	1989	32,31	76%	64,0

Tableau 6 : synthèse par département des stocks de C sur le massif Dordogne-Garonne

L'accroissement le plus important du stock de C dans la biomasse ligneuse concerne le département du Lot-et-Garonne (+35%), suivi par la Gironde (+28%) et enfin la Dordogne (+21%) principalement du fait de l'accroissement du volume sur pied. En effet, les forêts du Lot-et-Garonne voient leur stock de C moyen à l'ha croître de +31%, celles de la Gironde de +29% et enfin +13% pour les forêts de Dordogne.

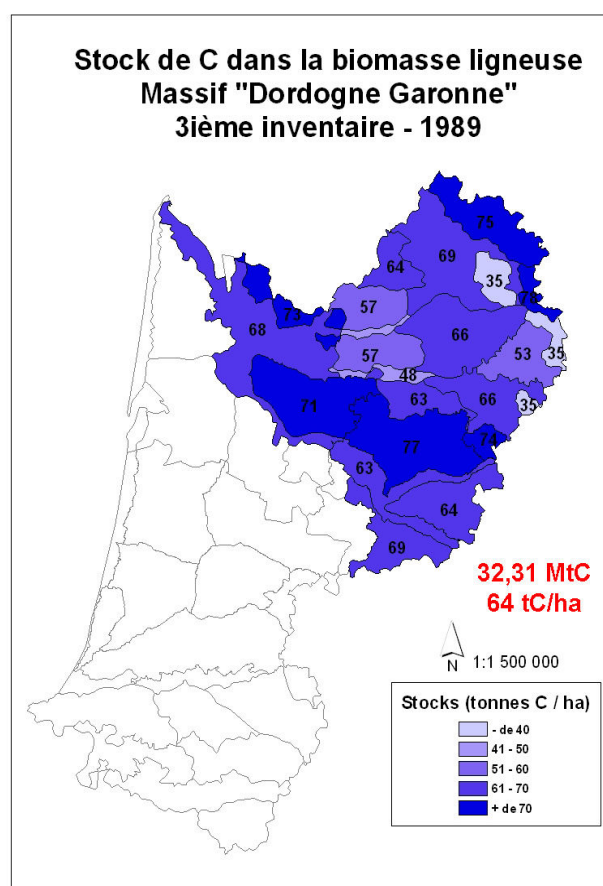
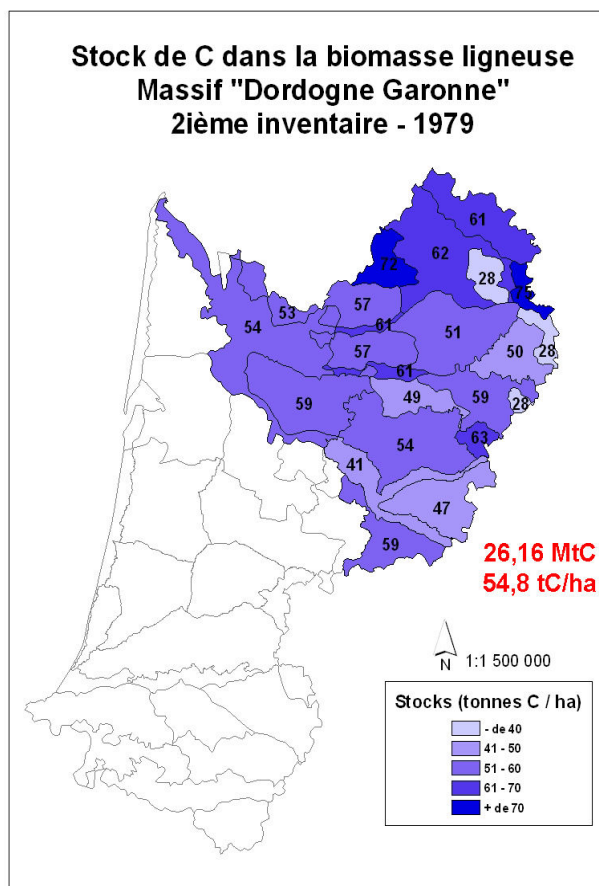
Les structures forestières qui présentent le stock de C moyen à l'ha le plus important (tableau 7) sont les futaies et les taillis sous futaies, sans distinction significative pour l'essence principale de futaie. La futaie feuillue est particulièrement riche en C en lien avec l'âge plus important des arbres. **Les structures en taillis présentent un stock de C moyen à l'ha faible.**

Structures forestières	inventaire 2 (tC/ha)	inventaire 3 (tC/ha)	variation du stock de C/ha
Futaie régulière conifères	53,1	65,7	24%
Futaie régulière feuillus	90,6	92,7	2%
Futaie feuillus + taillis	56,2	69,3	23%
Futaie conifères + taillis	62,9	65,9	5%
Taillis feuillus	31,1	34,9	12%

Tableau 7 : répartition du stock de C à l'ha par structures forestières sur le massif Dordogne-Garonne

Toutes les structures forestières ont connu une augmentation de leur stock de C moyen à l'hectare. Les structures pour lesquelles il a le plus progressé sont les futaies régulières de conifères, les taillis sous futaie de feuillus et les taillis. Ces tendances traduisent l'arrivée à maturité des peuplements et l'accumulation du matériel sur pied du fait d'un taux de prélèvement faible sur la ressource.

La comparaison par régions forestières des stocks de C à l'ha entre 1979 et 1989 (cartes 9 et 10) montre une tendance à la hausse sur tout le massif.



Cartes 9 et 10 : stocks de C dans la biomasse ligneuse du massif Dordogne Garonne en 1979 et 1989

- Conséquences de la tempête de 1999 sur le stockage de C du massif

La tempête a sévèrement frappé les forêts du massif Dordogne-Garonne.

L'IFN a procédé en 2002 à une estimation indirecte du volume de bois sur pied avant tempête et du volume de chablis dans le département de la Dordogne.

L'évaluation statistique des dégâts dans ce département est obtenue, sur la base de photos aériennes après tempête, en croisant la carte des types de peuplements du 3^{ème} inventaire et le volume mesuré en forêt en 1992. L'ordre de grandeur des résultats a été validé par une expertise du CRPF en 2001.

Quant à l'actualisation du volume sur pied avant tempête, elle s'est faite (i) par ajout au volume inventorié en 1992 de la production courante cumulée de la date d'inventaire (1992) jusqu'à fin 1999, et (ii) soustraction des prélèvements (récoltes, autoconsommation) effectués pendant la même période. La surface boisée est considérée stable sur la période 1992-1999.

Le rapport de l'IFN publié en 2002 précise les méthodes mises en œuvre ainsi que leurs biais. **Les estimations des dégâts de tempête et du volume sur pied en 1999 sont certainement sous-évalués.**

Grâce à l'évaluation directe des dégâts et des volumes sur pied après tempête en Gironde et dans le Lot-et-Garonne (mesures sur le terrain en 2000), il est possible de fournir un ordre de grandeur des conséquences de la tempête sur le stock et le stockage annuel moyen de C du massif Dordogne-Garonne.

La perte totale au niveau du massif Dordogne-Garonne s'élève à 7 Mm³ (9% du volume sur pied estimé en 1999) **dont 3,9 Mm³ pour les résineux** (16,5% du volume sur pied en 1999) **et 3,1 Mm³ pour les feuillus** (5,7% du volume sur pied en 1999). Par conséquent la part des feuillus dans le volume de bois sur pied du massif augmente (tableau 8).

	Volume 1999 (Mm ³)	Part feuillus 1999 (%)	Volume 2000 (Mm ³)	Part feuillus 2000 (%)
Dordogne	58,32	67	52,96	69
Gironde	10,29	65	8,81	74
Lot-et-Garonne	9,14	89	8,98	89
Massif Dordogne-Garonne	77,75	69	70,75	72

Tableau 8 : conséquences de la tempête sur le stock de bois sur pied et la part des feuillus

La Dordogne à elle seule a perdu 5,4 Mm³ de bois, soit 9,2% de son volume sur pied estimé en 1999. Les peuplements le plus touchés sont les reboisements artificiels de conifères de 15 à 30 ans qui arrivaient en pleine production et constituaient l'avenir de la réserve résineuse de la Dordogne (PEFC Aquitaine 2001).

La tempête a décapitalisé 3,06 MtC stockées dans la biomasse ligneuse de forêts du massif Dordogne-Garonne. Par conséquent, elle a entraîné le déstockage de 12,55 MtC au niveau de la région Aquitaine (dont 9,49 MtC pour le massif landais). Cependant, alors que la prise en compte des conséquences de la tempête sur le stockage de C dans la biomasse ligneuse du massif landais conduit à un caractère de source, le stockage moyen annuel demeure positif sur le massif Dordogne-Garonne. Il est estimé à +0,19 MtC/an sur la période 1989-2000 (tableau 9).

	1989	1999	2000
Stocks de C	32,31 MtC	37,46 MtC	34,4 MtC
Stockage moyen annuel de C	+0,52 MtC/an		
	+0,19 MtC/an		

Tableau 9 : Impact de la tempête sur les stocks et flux de C du massif Dordogne-Garonne

Deux facteurs permettent d'expliquer la dynamique observée : (i) le maintien d'un stockage additionnel fort entre 1989 et 1999 (+0,52 MtC) en lien avec l'accroissement du volume sur pied dans la région (+15%), et (ii) la moindre sévérité des dégâts de tempête.

- Perspectives d'évolution du stockage de C sur le massif Dordogne-Garonne
L'évolution du stockage de C dans la biomasse ligneuse à moyen terme sur le massif Dordogne-Garonne dépendra principalement (i) de la stratégie et des moyens dégagés pour la reconstitution des peuplements touchés par la tempête, (ii) de l'évolution du niveau des prélèvements sur la ressource, (iii) de l'évolution de la surface boisée dans les régions agricoles du sud frappées par les crises des secteurs viticoles et arboricoles, et (iv) de l'impact des changements climatiques.

2.6.5. Stocks et flux de carbone sur le massif Adour-Pyrénées

Sur la période 1982-1992, la biomasse ligneuse des forêts de la région Adour-Pyrénées a constitué un puits de C de 3,78 MtC (+0.38 MtC/an), soit une hausse de 22% du stock sur pied calculé en 1982 (17,08 MtC). Comme pour la région Dordogne-Garonne, le stockage additionnel s'explique (i) par l'accroissement de la surface boisée de +11.000 ha sur la période, et (ii) par la progression du stock de C moyen à l'ha de 17%.

En effet, l'IFN relève un accroissement fort du volume de bois à l'ha (de 139 à 163 m³/ha sur la période) du fait d'un niveau de prélèvement faible sur la ressource égal à 47% de l'accroissement biologique annuel (PEFC Aquitaine 2001). Les forêts d'Adour-Pyrénées sont globalement sous-exploitées.

Dans la région Adour-Pyrénées les stocks de C dans la biomasse ligneuse sont constitués pour 90% par les essences feuillues. Leur niveau de contribution au stock de C du massif est resté stable sur la période 1982-1992 (tableau 10).

Département / Massif	Année d'inventaire	Stock C biomasse ligneuse (MtC)	Contribution des feuillus	Stock C (tC/ha)
40	1978	3,24	80%	54,0
64	1985	13,84	93%	77,1
Adour Pyrénées	1982	17,08	90%	71,3
40	1988	4,19	80%	74,4
64	1995	16,66	92%	85,8
Adour Pyrénées	1992	20,86	90%	83,3

Tableau 10 : synthèse par départements des stocks de C sur le massif Adour-Pyrénées

Les forêts au sud du département des Landes ont connu la plus forte hausse du stock de C dans la biomasse ligneuse (+29%) devant celles des Pyrénées-Atlantiques qui voient leur stock croître de 20%. L'évolution du stock de C moyen à l'ha est également très forte dans les Landes (+38%). Elle illustre l'extrême faiblesse des prélèvements de bois dans cette région agricole où les forêts paysannes sont morcelées et peu gérées. L'accroissement du stock de C moyen à l'ha est plus modeste dans le département des Pyrénées-Atlantiques avec +11% sur la période. Toutefois, les quantités de C à l'ha en 1982 et 1992 sont bien au-dessus des moyennes nationales établies par Pignard à 59,4 tC/ha en 1984 et 71 tC/ha en 1996 (Carbofor, 2004). L'ensemble de ces résultats est cohérent avec un niveau d'exploitation très faible sur la ressource.

Les structures forestières qui présentent le stock de C à l'ha dans la biomasse ligneuse le plus important (tableau 11) sont les futaies irrégulières (hêtraies sapinières) et la futaie régulière de feuillus (hêtraie). Ces forêts matures de montagne se caractérisent par des volumes moyens à l'ha considérables et par des taux de prélèvements faibles dans des régions souvent difficiles d'accès.

Les taillis sous futaie présentent des niveaux de stocks de C à l'ha moyens, comparables à ceux que l'on rencontre sur le massif Dordogne-Garonne.

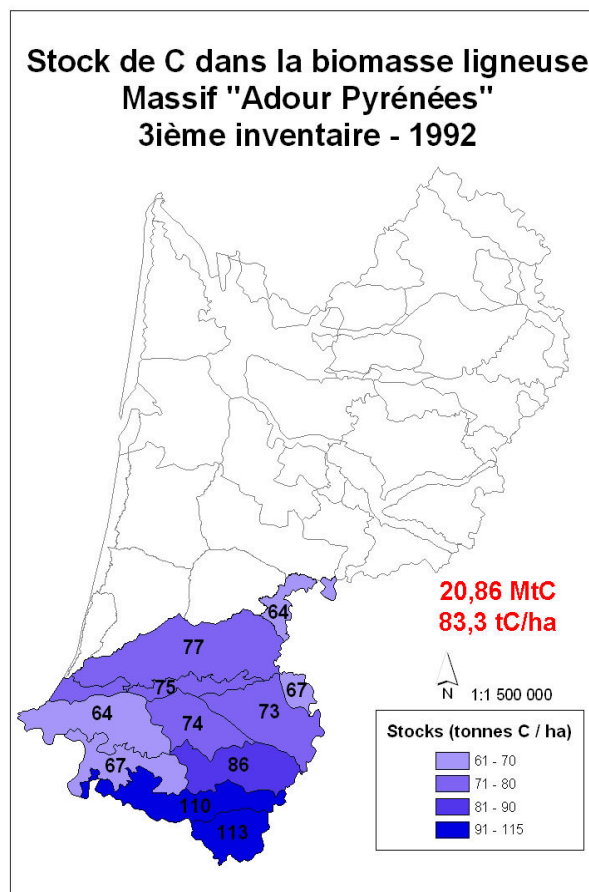
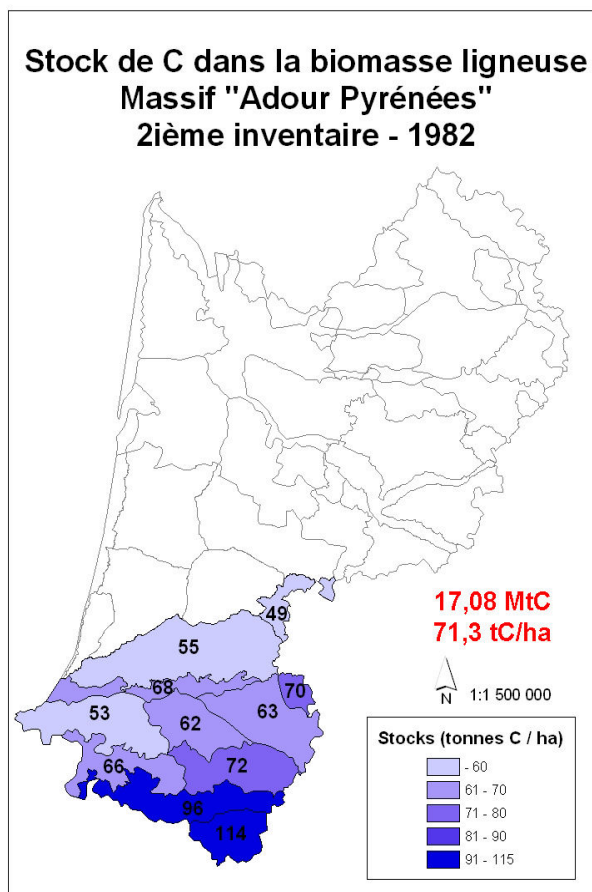
Enfin, les taillis sont traditionnellement les structures qui séquestrent le moins de C à l'ha dans la biomasse ligneuse. On notera toutefois que les taillis d'Adour-Pyrénées présentent un niveau de stock et une séquestration additionnelle de C à l'ha nettement supérieure à ceux de Dordogne-Garonne malgré un accroissement plus fort des brins de taillis en Dordogne (2,16 m³/ha/an) que dans les Pyrénées-

Atlantiques ($1,04 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$). Ces résultats témoignent de l'abandon progressif de ce mode de conduite des peuplements en Adour-Pyrénées.

Structures forestières	Inventaire 2 (tC/ha)	Inventaire 3 (tC/ha)	variation du stock de C/ha
Futaie régulière conifères	57,0	70,8	24%
Futaie régulière feuillus	90,4	99,5	10%
Futaie feuillus + taillis	56,5	65,5	16%
Futaie conifères + taillis	42,3	53,2	25%
Taillis feuillus	36,5	45,4	24%
Futaie irrégulière conifères	85,9	118,5	38%
Futaie irrégulière feuillus	76,9	90,2	17%

Tableau 11 : répartition du stock de C à l'ha par structures forestières sur le massif Adour-Pyrénées

Les cartes des stocks de C à l'ha dans la biomasse ligneuse (cartes 11 et 12) en 1982 et 1992 montrent un accroissement plus marqué dans la région des coteaux de l'Adour et des Gaves pyrénéens. Dans les forêts des coteaux et montagnes basques, le pâturage en forêt et l'écobuage limite la croissance du stock à l'ha.



Cartes 11 et 12 : stocks de C dans la biomasse ligneuse sur le massif Adour-Pyrénées en 1982 et 1992

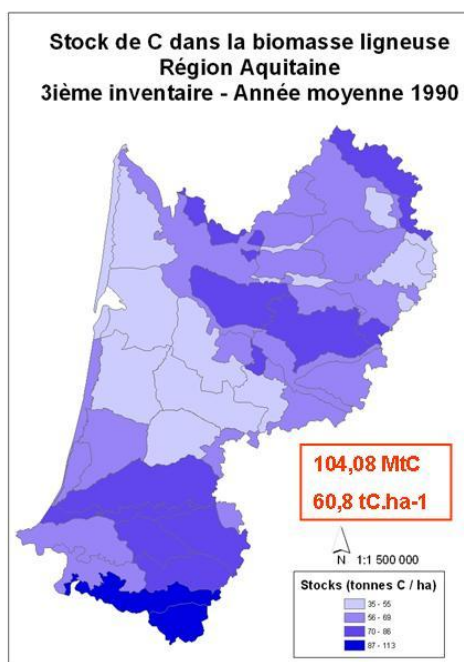
L'évolution du stockage de C dans la biomasse ligneuse à moyen terme sur le massif Adour-Pyrénées dépendra principalement du niveau des prélèvements sur la ressource. A niveau de prélèvements et de surface boisée stable, le stock de C en forêt devrait être maintenu élevé mais le stockage serait faible compte tenu de la maturité et de la moindre croissance annuelle des peuplements forestiers.

2.6.6. Stocks de carbone au niveau de la région administrative Aquitaine

Le stock de C dans la biomasse ligneuse des forêts d'Aquitaine s'établit pour l'année moyenne d'inventaire 1990 à 104,08 MtC. Ce chiffre correspondant à la somme des quantités de C dans la biomasse ligneuse des forêts des 5 départements aquitains calculées à partir des résultats du 3ème inventaire de l'IFN. **En 1990, la biomasse ligneuse d'1 ha de forêt en Aquitaine stockait en moyenne 60,8 tC.**

Les références qui permettent d'apprécier le niveau de stock de C moyen à l'ha des forêts d'Aquitaine dans le contexte national concernent les années 1984 (59,4 tC/ha) et 1996 (71 tC/ha). En faisant l'hypothèse d'une évolution linéaire entre ces 2 dates, le stock de C moyen à l'ha estimé en 1990 au niveau national serait de 65,2 tC/ha. Ainsi, la futaie de pin maritime landaise caractérisée par un stock de C moyen à l'ha faible, contribue à ce qu'un ha de forêt en Aquitaine contienne en moyenne moins de C qu'un ha au niveau national.

Les tendances de stockage de C en forêt seront évaluées avec la fourniture des résultats d'inventaires actualisés de la Dordogne et des Pyrénées-Atlantiques.



Carte 13 : stock de C dans la biomasse ligneuse de la région Aquitaine (année moyenne 1990)

La carte 13 de la répartition par régions forestières des stocks de C dans la biomasse ligneuse à l'ha fournit des informations sur le type de sylviculture pratiquée, sur le niveau des prélèvements sur la ressource et sur la productivité du milieu.

Les niveaux de stock de C à l'ha sont relativement faibles sur le massif landais du fait du caractère intensif de la ligniculture du pin maritime. A l'inverse ils sont également faibles dans les régions où la productivité forestière est extrêmement limitée (cas des Causses en Dordogne).

Les forêts des régions à caractère agricole situées dans les grands bassins du nord de l'Aquitaine présentent des stocks de C à l'ha relativement faibles. Toutefois, l'étude des flux dans ces régions a montré un accroissement rapide du stock de C à l'ha en lien avec des prélèvements faibles sur la ressource.

Les forêts des régions d'élevage (nord de la Dordogne, Chalosse, coteaux entre Dordogne et Garonne) ont des niveaux de stock de C à l'ha relativement importants. Il s'agit le plus souvent de structures en futaies et taillis sous futaie.

Enfin les stocks à l'ha les plus importants se rencontrent dans les vieilles futaies irrégulières des hautes Pyrénées. Ces forêts matures ne sont exploitées que de façon marginale ce qui leur permet de capitaliser une quantité importante de C dans la biomasse ligneuse.

2.6.7. Stocks de carbone au niveau de la zone atelier de Pontenx

En 1999, les 84.600 ha de formations boisées de production que compte la zone atelier de Pontenx renfermaient un stock de C dans la biomasse ligneuse de 4,65 MtC, soit un stock moyen de 55 tC/ha. Cette valeur, confrontée aux 57,3 tC/ha calculés au niveau du massif landais en 1999, traduit le caractère intensif de la sylviculture du pin maritime pratiquée à l'échelle de la zone de Pontenx.

Les pins maritimes représentent 96,5% du stock sur pied (figure 6) ; les chênes (principalement rouvres et tauzin) représentent 51% des 0,16 MtC stockés dans la biomasse ligneuse des essences feuillues.

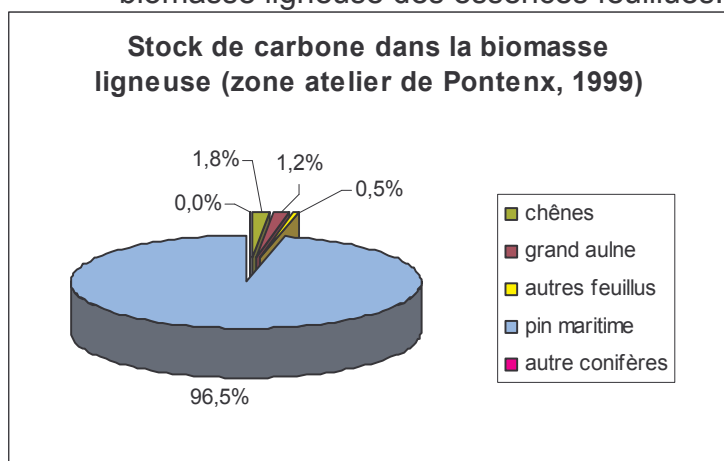


Figure 6 : Stock de C dans la biomasse ligneuse par essences

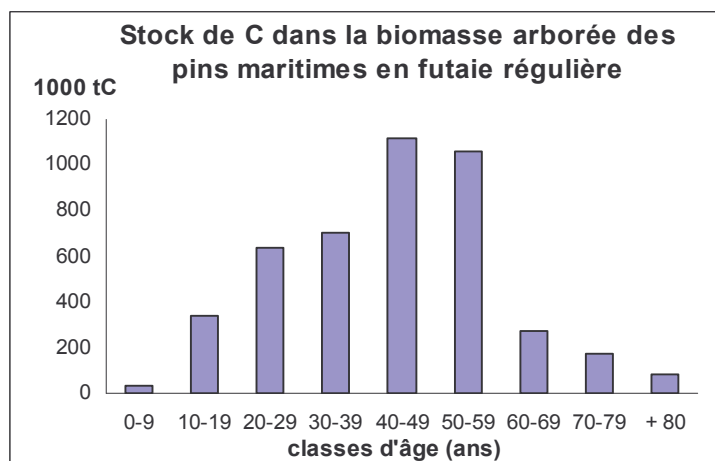


Figure 7 : Stock de C dans la biomasse arborée des pins maritimes en futaie régulière

La répartition par classes d'âge du stock de C dans la biomasse des pins maritimes de futaie régulière (figure 7) confirme le caractère intensif de la sylviculture pratiquée dans la région. En effet, les peuplements de plus de 60 ans représentent 12% du stock total de C sur pied contre 13,4% en moyenne sur le massif.

3. Evaluation des stocks et flux de carbone dans les sols forestiers

3.1. Etat de l'art sur le stock et le stockage de carbone dans les sols

3.1.1. Evaluation des stocks de carbone dans les sols

Les sols contiennent une quantité colossale de carbone. Des travaux publiés par l'IPCC (2001) montrent qu'en 1996 les sols mondiaux (jusqu'à 1 m de profondeur) séquestrent 53% du C organique non fossile des terres émergées. Les sols forestiers mondiaux représentent un stock de 632 GtC (figure 8), soit plus que tout le C contenu dans la biomasse terrestre (610 GtC dont 80% en forêt).

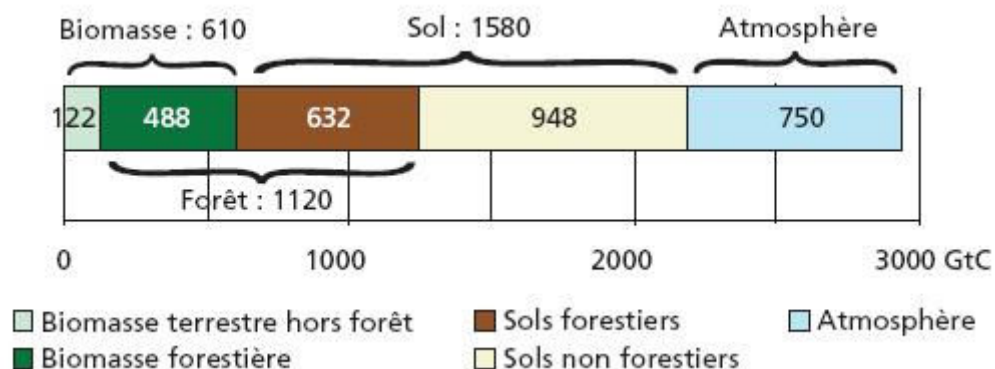


Figure 8 : stocks de C mondiaux dans les compartiments terrestres (IPCC, 2001)

Au niveau français, les sols représentent également un réservoir majeur de carbone. Sur la base de 19.000 références, l'INRA a estimé en 2001 que le stock de C organique dans les sols de France (tous usages) s'élève à 3100 MtC (soit 62 tC/ha) pour une profondeur de 30 cm, hors litière et humus. La profondeur de 30 cm correspond au choix de n'estimer le stock de C que dans les horizons susceptibles d'être significativement influencé (i) par un travail du sol, (ii) par un changement d'usage et (iii) par des modifications du climat (Arrouays 1999).

Les sols de vignes et vergers (30 t/ha) et les terres arables (45 t/ha) sont les plus pauvres en C. Les forêts et prairies ont des stocks assez élevés et sensiblement identiques (près de 70 tC/ha). Enfin les pelouses alpines et les zones humides possèdent les sols les plus riches en carbone (95 t/ha).

Les déterminants majeurs du niveau de stocks sont (i) le type et (ii) l'occupation des sols. On observe toutefois une grande dispersion en croisant ces 2 facteurs explicatifs. Ainsi d'autres paramètres entrent en compte dans l'établissement du niveau de stock des sols. Il s'agit notamment des usages antérieurs. En effet le stock mesuré à l'instant t sous un usage donné ne correspond souvent pas au stock « à l'équilibre » pour cet usage (Arrouays 2002). C'est le cas par exemple des sols forestiers issus de boisement d'anciennes terres agricoles.

Enfin, les sols forestiers constituent également d'importants réservoirs de C organique en France. Sur la base des analyses de sols conduites entre 1993 et 1994 sur les 540 placettes françaises du réseau systématique européen de suivi de l'état de santé des forêts (réseau 16 x16 ou réseau de niveau I), **Dupouey estime (1999) que les sols forestiers français contiennent 1025 MtC, soit 71 tC/ha (30 cm hors litière). Ils séquestrent alors 51% du stock de C total dans les écosystèmes forestiers français.** Hors litière, Belkacem (1998) note que la distinction feuillus/conifères ne permet pas de mettre en évidence des différences significatives mais que des disparités fortes se rencontrent par contre au sein des groupes d'essences feuillus et conifères. Enfin, le stock de C en intégrant la litière est évalué à 1140 MtC, soit 79 tC/ha (Dupouey 1999).

3.1.2. Enjeux liés à l'évaluation des stocks et flux de carbone des sols

Les sols peuvent se transformer en puits ou en sources de C considérables compte tenu de l'importance de leur niveau de stock (Lugo & Brown, 1993).

Balesdent (1999) a estimé qu'entre 1900 et 1998 le stock de C des sols de France a progressé selon une hypothèse moyenne de +215 MtC soit +4 tC/ha. Et Arrouays (2001) estime qu'un accroissement au niveau national de 0,13% par an du stock de C dans les sols permettrait de compenser l'ensemble des émissions annuelles de CO₂ du secteur agricole français.

La dynamique de stockage de C dans les sols forestier est fonction de 2 facteurs (Balesdent, 1999) :

(i) **Le premier concerne l'action directe de l'homme sur la végétation et le sol via l'utilisation des terres.** Les changements d'usage des sols (défrichements, boisements), l'intensité des prélèvements de biomasse en forêt, les travaux d'assainissement et le travail des sols forestiers contribuent à la dynamique de stockage (positive ou négative) des sols (Arrouays 1994 et 2002, Trichet 1999).

(ii) **Le second facteur de stockage concerne les modifications du milieu naturel et notamment le climat.** Ainsi, une augmentation de la température tend à déstocker le C des sols en entraînant une minéralisation rapide des matières organiques. Balesdent estime que l'augmentation de la température aurait conduit entre 1900 et 1998 au niveau national à un déstockage de C des sols de 140 MtC.

Il est par conséquent nécessaire de suivre l'évolution des stocks de C des sols forestiers et d'évaluer les impacts des choix sylvicoles et des différentes pratiques de gestion sur le flux de C des sols, d'autant plus dans un contexte de changements climatiques. A terme des recommandations techniques pour la conservation et l'accroissement du stock de C des sols seraient proposées aux gestionnaires.

3.1.3. Méthodes pour l'évaluation des stocks et flux de carbone des sols

- Evaluation des stocks de carbone des sols

Selon Arrouays (2002), « il n'existe pas à l'heure actuelle de mesure indirecte fiable des stocks de C des sols ». L'estimation des stocks de C dans les sols est complexe, notamment parce que les données disponibles sont issues de mesures ponctuelles de la teneur en C convertie en masse par l'emploi d'une densité apparente (rapport entre la teneur en C exprimée dans une masse et un volume donné). Le stock est ensuite extrapolé à des surfaces dont les sols sont considérés homogènes. Les sources d'erreurs sont importantes ; outre les étapes de calcul présentées ci-dessus le faible nombre d'échantillons de mesure en lien avec la forte variabilité des stocks dans les sols contribue à l'incertitude globale.

Les sols forestiers sont néanmoins surveillés sur les 642 placettes permanentes des réseaux européens de niveau I (réseau 16 x 16) et II (RENECOFOR) en France. Toutefois le stock de C n'y a été mesuré qu'une seule fois entre 1993 et 1995.

- Evaluation des flux de carbone des sols

Les dynamiques de stockage / déstockage du C des sols sont lentes et compte tenu du faible nombre de répétitions de mesures, il n'est pas envisageable de développer une approche fiable basée sur la comparaison des stocks entre 2 dates.

L'évaluation des flux de C des sols par la méthode du bilan annuel des échanges de CO₂ est très imprécise car les flux concernant les sols (de l'ordre de quelques dizaines de gC/m²/an) sont masqués par les flux bruts (photosynthèse / respiration) de l'écosystème de 50 à 100 fois supérieurs (Balesdent, 1999).

Par conséquent la recherche a développé une méthode indirecte d'estimation des flux de C des sols. Il s'agit d'une des méthodes retenues par l'IPCC. En France elle devrait permettre d'estimer la contribution des sols nationaux aux émissions de CO₂ dans le cadre des publications pour l'UNFCCC.

Il s'agit de fonctions exponentielles qui permettent de modéliser la dynamique de stockage / déstockage lors du passage d'un usage du sol A vers un usage B (Balesdent 1999, Arrouays 2002). Des paramètres spécifiques permettent alors au stock supposé « à l'équilibre » de l'usage A de tendre plus ou moins rapidement vers le niveau de stock supposé « à l'équilibre » de l'usage B (figure 9).

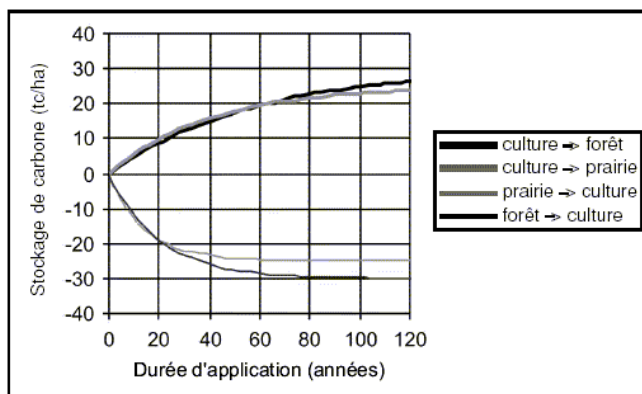


Figure 9 : changement d'usage des sols et évolution du stock de C – incertitude relative estimée entre 30 à 50% (Arrouays, 2002)

Il est alors possible pour une date donnée d'extraire un flux moyen annuel à partir d'une matrice des changements d'usage des sols renseignée par l'enquête TerUti. Toutefois, les paramètres de l'équation méritent d'être précisés pour le contexte national / régional.

3.2. Objectifs de l'étude sur le carbone des sols forestiers en Aquitaine

Il s'agit de renseigner l'indicateur 1.4 sur le stock de C dans les sols forestiers (i) à différentes échelles au sein de la région Aquitaine et (ii) à partir de données issues de la littérature. Une revue de la bibliographie doit également permettre de souligner les principaux facteurs de stockage / déstockage de C dans les sols landais en lien avec les pratiques sylvicoles et les techniques de gestion des sols.

Notons enfin que l'évaluation des stocks de C dans les sols de la zone de Pontenx permettra d'estimer de manière plus précise les facteurs de stockage de C dans les sols forestiers. Ces travaux seront conduits par les chercheurs de l'INRA de Bordeaux et du Cemagref dans le cadre du projet FORSEE en Aquitaine.

3.3. Evaluation des stocks de carbone dans les sols forestiers en Aquitaine

3.3.1. Données disponibles

Dans le cadre du projet CARBOFOR, l'INRA d'Orléans et l'IFN ont mis au point la base de données « FORETS » (propriété de l'INRA) qui renseigne, au niveau national et pour chaque région forestière départementale, l'occupation relative par type de sol forestier et le stock de C moyen à l'ha de ces sols pour des peuplements feuillus, conifères et mélangés (profondeur 0-20 cm, litière exclue).

L'IFN a également apporté à la base FORETS les dernières données d'inventaire disponibles en 2003 et notamment la part relative de chaque groupe d'essences (feuillus/conifères) dans la surface boisée des régions forestières. Pour la région Aquitaine les données d'inventaire correspondent à l'année moyenne 1997.

La méthode mise en œuvre par l'INRA est décrite par Arrouays dans le rapport final du projet CARBOFOR. Elle s'appuie sur 3 bases de données nationales :

- La base de données géographique des sols de France au 1/1.000.000 Elle renseigne sur les types de sols et leur fréquence par régions géographiques homogènes pour des critères pédologiques (King, 1999).

- La base de données « Carbone-France »

Elle est constituée d'un ensemble de 1200 profils forestiers géoréférencés pour lesquels sont renseignés notamment la teneur en C, la densité apparente et le type de sol (Arrouays, 1999). Ces profils sont extraits des bases de données (i) DONESOL (base de données des études pédologiques), (ii) Réseau européen de suivi des dommages forestiers (540 placettes de niveau I) et (iii) RENECOFOR (102 placettes de niveau II).

- La base de données écologique de l'IFN

Elle est constituée de plus de 108.000 points de sondages renseignés par plus d'une trentaine d'attributs dont le nom du sol, la pierrosité et la texture par horizon. Les 5 départements aquitains disposent de données renseignées dans cette base.

Dans le cadre du projet CARBOFOR, il a été demandé que la base de données à fournir concerne les caractéristiques des sols forestiers. Cependant, la base de données des sols de France au 1/1.000.000 ne distingue pas ou mal l'occupation du sol par type de sol dans une région. Une procédure de détermination des types de sols sous forêt a donc été entreprise en collaboration avec l'IFN. Elle consiste à utiliser l'information contenue dans la base de données écologique de l'IFN et la base de données « Carbone-France ».

3.3.2. Méthode de calcul des stocks de carbone des sols forestiers en Aquitaine

- Calcul des stocks de C

La base de données FORETS nous renseigne, par régions forestières départementales, sur le stock de C à l'ha par types de sols forestiers et sous des peuplements feuillus, résineux et mélangés (profondeur 20 cm hors litière). Elle précise également la surface relative occupée par chaque type de sol dans chacune des régions forestières départementales en Aquitaine.

Toutefois la base de données ne contient pas d'information sur la distribution spatiale des types de sol dans les régions forestières. Par conséquent il n'est pas possible en l'état d'obtenir le taux de boisement relatif de chaque groupe d'essences par types de sol en effectuant un croisement avec les données cartographiées de l'IFN.

Pour contourner ce problème nous avons retenu 2 hypothèses simplificatrices : (i) la proportion en surface des groupes d'essence mesurés sur la région est également vraie pour chaque type de sol, (ii) les types de sols se répartissent de façon homogène sur tout le territoire de la région.

Ainsi, on calcule un stock de C moyen à l'ha pour un type de sol donné à partir du taux de boisement relatif par groupe d'essences calculé à l'échelle de la région. La somme pondérée par la fréquence en surface des types de sol donne le stock de C moyen à l'ha des sols forestiers pour la région forestière.

Les valeurs de stock de C moyens calculées ici ne sont pas entièrement satisfaisantes. En effet, les hypothèses qui ont été faites sont grossières. Cependant la méthode mise en œuvre est celle qui permet d'intégrer au mieux les données disponibles à l'échelle régionale.

- Calcul des flux de C

Les valeurs de stock de C moyen des sols forestiers calculées ici sont issues de mesures qui n'ont pas été répétées jusqu'à maintenant. Par conséquent il n'est pas possible d'estimer les flux de C des sols par la méthode de comparaison des stocks.

La méthode indirecte basée sur les transferts de surface entre les différents usages du sol n'a pas pu être mise en œuvre car nous n'avons pas eu accès à la matrice des changements d'usages issue de l'enquête TerUti dans le cadre de la convention.

3.4. Résultats

Les 20 premiers cm de sol hors litière d'un ha moyen de forêt en Aquitaine séquestrent 49 tC, soit 85 MtC à l'échelle de la région. Ces résultats sont calculés à partir de la surface boisée correspondant à l'année d'inventaire moyenne 1997.

Sur la base des analyses de sol des 540 placettes du réseau de niveau I, Dupouey (1999) estime qu'en moyenne le C contenu dans la profondeur 20-30 cm représente 18% du stock total calculé sur la profondeur 0-30 cm. Par conséquent, **les sols des forêts d'Aquitaine séquestrent environ 104 MtC, soit 60 tC/ha (0-30 cm).**

Cette valeur est bien inférieure à la moyenne nationale estimée à 71 tC/ha par Dupouey (1999) à partir d'une méthode de calcul différente. Bien que la méthode soit sujette à des hypothèses lourdes (notamment pour ce qui concerne l'extrapolation des valeurs ponctuelles à la France entière), l'ordre de grandeur de 70 tC/ha dans les sols forestiers est corroboré par Arrouays (1999) via une autre méthode. **Les podzols très fréquents en Aquitaine stockent moins de C à l'ha que les principaux types de sols forestiers** (figure 10).

La base FORETS utilisée pour le calcul des stocks de C dans les sols forestiers en Aquitaine est jugée fiable. En effet le regroupement des types de sols en régions homogènes (Base Géographique des Sols de France) et l'évaluation des stocks de C sur les 1200 profils qui constituent la base « Carbone-France » ont fait l'objet de nombreuses publications citées dans ce document.

L'erreur générée par la méthode de calcul au niveau des régions forestières en Aquitaine est quant à elle difficile à quantifier. Compte tenu de la méthode, elle est plus importante dans des régions où les types de sols sont variables, voire d'une amplitude extrême, et où les peuplements sont mélangés. Pour cette raison l'analyse des résultats régionaux n'est pas détaillée par régions forestières départementales.

Dans notre approche, hormis pour les podzols, **le principal facteur de variation du stock de C des sols est le type de sol en lien avec la teneur en argile** (figure 10). De par la méthode de calcul employée ici, l'usage antérieur du sol n'est pas un facteur de variation des stocks de C à l'hectare. Or son influence n'est pas négligeable sur le massif Dordogne-Garonne par exemple où l'agriculture occupait une surface importante il y a encore quelques décennies.

Enfin, depuis les travaux de Belkacem (1998) on sait que la distinction feuillus/conifères n'induit pas de différence significative sur le stock de C à l'ha des sols hors litière.

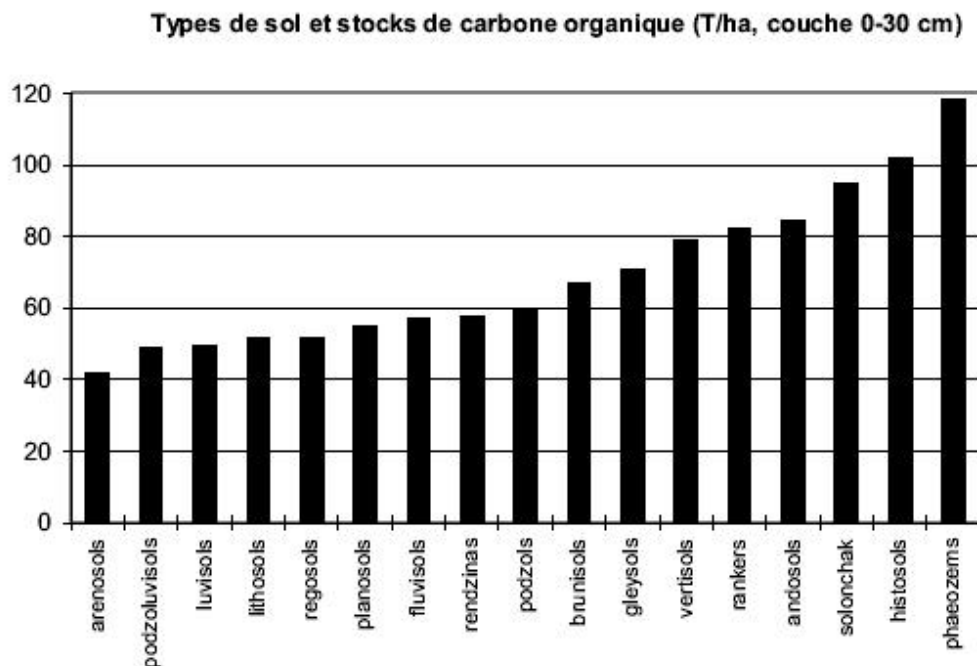
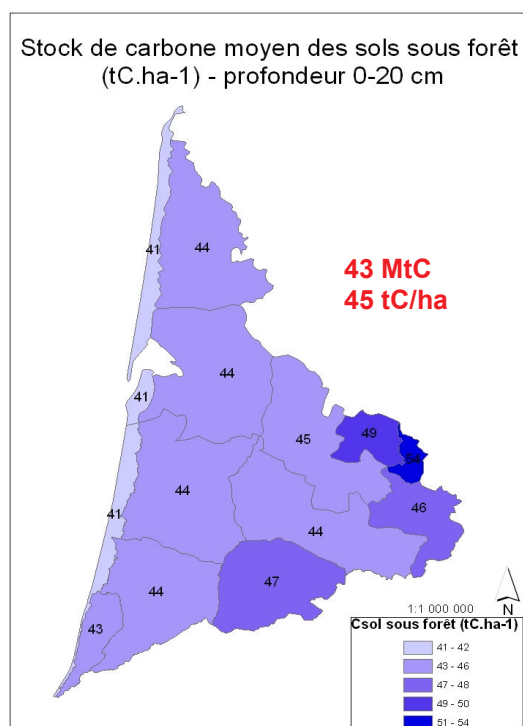


Figure 10 : stock de C moyen par types de sols selon la classification de la FAO (Arrouays, 2002)

Les sols forestiers du massif des Landes de Gascogne stockent 43 MtC, soit en moyenne 45 tC/ha (profondeur 0-20 cm). En extrapolant les résultats à la profondeur 0-30 cm, **ils stockent environ 52 MtC, soit 55 tC/ha en moyenne**. Ces résultats mériteront d'être comparés aux évaluations réalisées sur la zone de Pontenx.

Nous proposons une analyse de la répartition par régions forestières des stocks de C à l'ha (carte 14) sur le massif des Landes de Gascogne compte tenu de l'homogénéité des types de sol et de la part prépondérante des peuplements de conifères. Ces caractéristiques confèrent une bonne fiabilité à la méthode régionale.



Carte 14 : stock de C moyen dans les sols forestiers du massif landais (0-20 cm)

Le gradient Ouest-Est croissant de stock de C à l'ha sur le massif s'explique principalement (i) par la diminution de la part relative des sols jeunes et podzolisés dans les régions forestières et (ii) par l'augmentation relative de sols argileux.

Ainsi, les régions aux stocks de C les plus importants à l'ha (Bazadais, région de Mont-de-Marsan) sont celles où la surface relative des podzols est la plus faible (55%). On rencontre des sols brunifiés (25%) et des sols glaiseux (16%) caractérisés par des teneurs en argiles relativement importantes et des stocks de C à l'ha plus importants que les sols podzolisés.

Les sols podzolisés (94% de la surface relative) du plateau landais présentent des niveaux de stocks de C à l'ha moyens.

Enfin, dans les régions des dunes littorales, les sables jeunes et les sols ocres podzoliques peu évolués (97% de la surface relative) présentent les niveaux de stocks les plus faibles. Ces sols peu évolués et profonds sont le support d'une végétation réduite. La teneur en matières organiques de ces sols est faible.

4. Bilan de l'indicateur « stocks de carbone » en Aquitaine

4.1. Méthodes de calcul des stocks et flux de carbone forestiers en Aquitaine

La mission qui nous a été confiée consistait à développer une méthode d'estimation robuste et reproductible de l'indicateur de gestion durable des forêts « stocks de carbone dans la biomasse ligneuse et dans les sols » (processus d'Helsinki, Vienne 2003) à l'échelle (i) de la région Aquitaine, et (ii) des massifs PEFC.

Il ressort de l'analyse que les méthodes disponibles varient principalement en fonction (i) du compartiment de l'écosystème et (ii) de l'échelle prise en compte. En Aquitaine, elles ont conduit à l'élaboration de méthodes spécifiques.

4.1.1. Evaluation des stocks de carbone dans la biomasse ligneuse

L'approche proposée pour l'évaluation du stock de C dans la biomasse ligneuse s'applique à l'échelle de la région administrative et des massifs PEFC. Elle consiste à convertir successivement les résultats d'inventaire ventilés par régions forestières départementales en biomasse ligneuse totale puis en masse de C. Il s'agit de la méthode proposée par l'IPCC (2003) pour l'inventaire des émissions éligibles à l'UNFCCC et au protocole de Kyoto. Elle a également fait l'objet de nombreuses publications en France (Dupouey 1999, IFN 2000, Pignard 2000, Carbofor 2004).

Si la méthode dans sa forme générale peut être mise en œuvre à tous les niveaux (international, national, régional, sub-régional, local), des ajustements spécifiques sont envisageables pour une meilleure précision en fonction du domaine d'étude.

En Aquitaine, nous proposons d'employer différents jeux de coefficients pour la conversion du volume de tronc (ou des grandeurs dendrométriques des arbres inventoriés) en masse de C totale (partie aérienne et racinaire). Elles sont fonction (i) du domaine géographique d'étude et (ii) du niveau de précision souhaité.

Ainsi, pour le calcul des stocks de C dans les pins maritimes de futaie régulière sur le massif landais il est souhaitable d'utiliser les coefficients spécifiques disponibles. Ils sont jugés les plus précis.

A l'inverse, pour une estimation du stock de C dans la biomasse ligneuse de toutes les essences présentes dans toutes les structures forestières à l'échelle des massifs PEFC et de la région Aquitaine, il est recommandé d'utiliser les coefficients génériques nationaux.

A l'échelle de la région Aquitaine et du massif des Landes de Gascogne, l'édition de synthèses par addition de résultats issus des jeux de coefficients spécifiques et génériques n'est pas conseillée compte tenu du niveau de développement actuel des coefficients. En effet, ils ne permettent pas d'estimer la même biomasse et les incertitudes qui leurs sont associées sont de nature diverse et encore mal évaluées.

4.1.2. Evaluation des flux de carbone dans la biomasse ligneuse

L'IPCC propose 2 méthodes pour le calcul des flux de C dans la biomasse ligneuse.

La première consiste à dresser le bilan annuel entre les flux de biomasse entrants (accroissement de biomasse ligneuse) et les flux de biomasse sortants (récolte + pertes d'exploitation + mortalité). Dupouey (2001) montre que sa mise en œuvre est complexe en France compte tenu (i) de l'hétérogénéité des sources de données et (ii) d'une évaluation imparfaite des flux de biomasse sortants.

La seconde méthode de calcul repose sur la comparaison des stocks de C dans la biomasse ligneuse entre 2 dates. **La mise en œuvre de cette méthode est fiable en France grâce à la continuité de l'action de l'IFN.** Et avec la nouvelle méthode d'inventaire, la fourniture de résultats annuels au niveau régional permettra de préciser l'ampleur des tendances de stockage / déstockage.

4.1.3. Evaluation des stocks et flux de carbone dans les sols forestiers

L'évaluation des stocks de C dans les sols forestiers de France se révèle être une opération complexe car elle repose sur un nombre relativement faible de données compte tenu de la grande diversité naturelle des sols.

Elle a fait l'objet d'un travail spécifique dans le cadre du projet CARBOFOR. Les stocks de C à l'ha par type de sol, par régions forestières départementales et par groupes d'essences principales (feuillus / conifères / mélanges) ont été calculés en croisant plusieurs bases de données constituées au niveau national. Les résultats sont regroupés dans la base FORETS de l'INRA d'Orléans.

En Aquitaine et au niveau de chacun des massifs PEFC, les stocks de C dans les sols forestiers sont évalués en croisant les résultats de la base FORET avec la surface relative qu'occupe chaque groupe d'essence principale dans les régions forestières départementales.

Les flux de C des sols forestiers n'ont pas été renseignés ; les données de la base FORETS n'ayant pas encore fait l'objet d'une actualisation. Celle-ci pourrait avoir lieu avant 2008 dans le cadre de la mise en place au niveau national du RMQS²⁸ coordonné par l'INRA d'Orléans.

²⁸ RMQS : Réseau de Mesure de la Qualité des Sols

4.1.4. Perspectives d'amélioration de l'estimation des stocks et flux en Aquitaine

- Dans la biomasse ligneuse

Les principales sources d'amélioration attendues pour le calcul des stocks et des flux de C dans la biomasse ligneuse concernent (i) l'actualisation des coefficients de conversion des données IFN en biomasse ligneuse totale puis en masse de C et (ii) la fréquence de la fourniture des résultats d'inventaire.

Le jeu de coefficients spécifique aux pins maritimes landais a été construit en 2001. Des améliorations substantielles peuvent être escomptées compte tenu des avancées de la recherche.

Pour la partie aérienne, le facteur d'expansion de biomasse (ratio biomasse totale / biomasse aérienne) repose sur l'équation de Porté pour des pins âgés de 5 à 27 ans. L'implémentation de données mesurées sur des individus âgés de 52 ans préciserait la valeur du ratio pour les classes d'âge les plus élevées. D'autre part, une analyse architecturale des arbres permettrait de construire un ratio qui tienne compte de la découpe fin bout de 7 cm pour le volume de bois fort. Enfin, la biomasse foliaire pourrait être exclue du facteur d'expansion afin de renseigner la seule biomasse ligneuse, à l'instar des coefficients génériques CARBOFOR.

Pour la partie racinaire et pour la teneur en C du bois, des résultats en cours de publication (Bert, Danjon) devraient contribuer à préciser leur valeur.

Une tâche indispensable pour l'amélioration des évaluations du stock de C dans la biomasse ligneuse consiste à estimer l'incertitude associée à chaque jeu de coefficients spécifiques et génériques.

D'autre part, avec le changement de méthode d'inventaire, des résultats annuels seront exploitables à partir de 2006 à l'échelle de la région Aquitaine et du massif des Landes de Gascogne. Au niveau des massifs Dordogne-Garonne et Adour-Pyrénées la précision sera satisfaisante après environ 5 années. En effet, elle varie pour chaque département en fonction de son taux de boisement.

Outre l'évaluation plus fréquente des stocks de C dans la biomasse ligneuse, la réalisation d'un inventaire dans une approche nationale et non plus départementale permettra de fournir une information directement comparable des niveaux de stockage de C à l'instant t par massif PEFC.

- Dans les sols

Une amélioration des évaluations des stocks de C dans les sols forestiers en Aquitaine consisterait, à partir de la base FORETS, à préciser le taux de boisement attendu par types de sol et par régions forestières en Aquitaine.

Deux stratégies peuvent être envisagées :

- (i) Cartographier (si possible) les types de sol dans chaque région forestière et croiser cette information avec la carte des types de peuplements de l'IFN afin d'obtenir le taux de boisement moyen par type de sol et par région,
- (ii) Evaluer à « dire d'expert » les potentialités forestières de chaque type de sol dans chaque région.

4.2. Evaluation chiffrée de l'indicateur « carbone »

La synthèse des valeurs des stocks et flux de C dans la biomasse ligneuse des massifs PEFC et de la région administrative Aquitaine se trouve en annexe 9.

4.2.1. Stocks et flux de carbone dans la biomasse ligneuse avant tempête

En 1990, les forêts d'Aquitaine stockaient ~104 MtC dans la biomasse ligneuse.

Les forêts de Dordogne-Garonne présentent un stock de C sur pied moyen mais le niveau de stockage annuel est important (+2.4% par an entre 1979 et 1989) en raison (i) de l'augmentation de la surface boisée et (ii) d'une mobilisation relativement faible de la ressource conduisant à un accroissement du stock sur pied.

Les formations boisées d'Adour-Pyrénées ont quant à elles un niveau de stock sur pied important, principalement dans la zone de haute montagne. Le niveau de stockage est soutenu à l'échelle de la région (+2,2% par an entre 1982 et 1992) principalement du fait de la sous-exploitation du massif.

Enfin, les forêts du massif landais présentent un niveau de stock moyen et le taux annuel de capitalisation en forêt est positif mais réduit (+0.8% entre 1988 et 1999). Il s'explique par l'accroissement tendanciel du volume moyen à l'ha.

Ainsi, bien que l'évaluation des flux ne concerne pas les mêmes périodes pour chaque massif PEFC, **une estimation grossière indique que la biomasse ligneuse des forêts d'Aquitaine assimilait chaque année avant tempête de l'ordre de 1% des émissions annuelles françaises de CO₂** (CITEPA, 2003).

4.2.2. Impacts de la tempête de 1999

La tempête a entraîné le déstockage de 12,55 MtC au niveau de la région Aquitaine dont 3,06 MtC pour le massif Dordogne Garonne (8% du stock sur pied estimé en 1999) et 9,49 MtC pour le massif landais (17% du stock sur pied en 1999).

En ce qui concerne le massif Dordogne-Garonne, bien que l'impact de la tempête sur le stock de C du massif soit important, une estimation basée sur des données actualisées de l'IFN montre que la biomasse ligneuse demeure un puits de C de l'ordre de +0,2 MtC/an sur la période 1989-2000 en raison d'un accroissement important du stock de C moyen à l'ha entre 1989 et 1999.

La biomasse ligneuse du massif landais représente pour sa part une source importante de C, de l'ordre de -0,47 MtC/an sur la période 1988-2000.

Cette tendance intègre toutefois les conséquences d'un événement exceptionnel dont la fréquence de retour est a priori supérieure à la période de 12 ans considérée ici. Nos travaux ont montré qu'à moyen terme, dans des conditions de sylviculture standard et pour une reconstitution des peuplements endommagés sur 15 ans, le bilan de C sur la période 1988-2015 devient nul.

La question de l'éligibilité du stockage de C en forêt dans le protocole de Kyoto fait l'objet d'un débat au sein de l'IPCC compte tenu du risque de non-permanence de ces stocks. Elle a finalement été approuvée à Marrakech en 2001 (UNFCCC).

Toutefois l'approche UNFCCC qui considère le seul stockage de C en forêt est encore incomplète. En effet le stockage de C par l'activité forestière doit être pris en compte dans une logique de filière. Ainsi, dans les forêts cultivées, les déstockages occasionnels en forêt permettent souvent d'accroître les stocks dans les produits bois mis en œuvre. De plus la gestion des stocks constitués

hors forêt apparaît plus abordable car elle dépend des seules décisions anthropiques.

4.2.3. Stocks de carbone dans les sols forestiers

Nos résultats montrent que les sols forestiers aquitains et landais (profondeur 30 cm) représentent un stock de C aussi important que la biomasse ligneuse avec respectivement 60 et 55 tC par hectare.

4.3. Perspectives de stockage additionnel de carbone dans les forêts d'Aquitaine

4.3.1. Stratégies de stockage dans la biomasse ligneuse

L'étude de l'évolution des stocks de C dans la biomasse ligneuse au niveau des 3 massifs PEFC aquitains permet d'identifier différentes stratégies de stockage et d'évaluer leur caractère pérenne pour l'accroissement du rôle des forêts contre les changements climatiques.

- **Approches théoriques**

Si la volonté régionale est de capitaliser du C sur pied, on se rapproche des cas étudiés en Dordogne-Garonne et en Adour-Pyrénées. Le taux de prélèvement sur la ressource est bas ; le stock de C sur pied augmente rapidement et le stockage de C est important. Les forêts de la région se comportent alors comme un puits de C soutenu à moyen terme. Mais bientôt l'assimilation du C par les arbres se réduit dans les forêts matures et le stockage tend vers 0. A long terme, les forêts possèdent un stock de C sur pied considérable mais leur stockage additionnel est nul.

En effet, il n'est pas possible à l'échelle d'un massif de concilier à long terme un stock de C sur pied important et un stockage de C additionnel en forêt soutenu sans l'augmentation continue de la surface boisée. Cette option ne semble pas envisageable en Aquitaine où le taux de boisement (43,5% en 1997) est déjà supérieur à la moyenne nationale (27,1% en 1996).

Si la stratégie consiste alors à favoriser l'assimilation de C par la biomasse ligneuse, il est indispensable de renouveler les formations boisées en permanence pour bénéficier de l'optimum de croissance, et donc de fixation de CO₂, des forêts jeunes et adultes. Il s'agit alors de stocker le C en dehors des forêts, dans les produits bois. Dans ce cas, le stock de C en forêt est maintenu faible, tout comme le stockage additionnel en forêt. Par contre l'assimilation annuelle de CO₂ par les arbres est importante. On se rapproche ici du fonctionnement du massif landais. Dans cette option il apparaît que la prise en compte du stockage de C dans les produits bois est fondamentale. Mais si une approche filière est retenue, il devient alors nécessaire de dresser le bilan de C global de l'activité forestière et ainsi de quantifier également toutes les émissions de C du secteur forêt-bois (§ D.4).

- **Approche régionale**

Dans la pratique il s'agit d'adapter les stratégies aux contextes locaux.

A l'échelle de la région Aquitaine, il peut sembler judicieux de maintenir des stocks de C sur pied élevés dans les zones les moins faciles d'accès (forêt de montagne), sur les stations les moins productives (lande sèche, causses), ou dans les forêts qui stockent déjà une quantité considérable de C dans la biomasse et dans les sols (futaies anciennes de montagne).

A l'inverse, la stratégie visant à maximiser l'assimilation de CO₂ par la biomasse ligneuse peut être mise en œuvre sur les stations les plus productives (riches en éléments nutritifs et bien pourvues en eau pendant la période de croissance) ou dans les régions proches des grands bassins de consommation de produits forestiers (Dordogne, plateau landais mésophile, vallée de l'Adour). La mise en œuvre de la stratégie visant une assimilation maximale de C par les arbres chaque année n'est viable que dans le respect des règles de la gestion durable, notamment pour ce qui concerne le maintien des stocks de C des sols.

Si la conséquence de la tempête de 1999 est une réduction significative du stock sur pied dans les forêts d'Aquitaine pendant les années à venir, le rétablissement du niveau de stock antérieur à 2000 est à prévoir dans des délais relativement courts, fonctions de la vitesse de reconstitution des peuplements sinistrés.

- Les facteurs de la dynamique de stockage du C à long terme en forêt

A plus long terme, la dynamique de stockage du C dans la biomasse ligneuse des forêts d'Aquitaine dépend de modifications des facteurs anthropiques (niveau de récoltes, pratiques de gestion, évolution de la surface boisée) et de variations du milieu naturel, notamment le climat.

L'évolution du niveau de mobilisation de la ressource est le facteur essentiel de stockage de C à long terme en forêt.

Au niveau du massif, des niveaux de récolte inférieurs à la production annuelle conduisent à court et moyen terme à accroître le stockage de C sur pied.

Au niveau d'une parcelle à l'inverse, l'intensification de la sylviculture (par exemple pour limiter les risques liés aux tempêtes) affecte à la baisse les niveaux de stocks de C sur pied et le stockage additionnel en forêt. Mais la mise en production de peuplements issus de graines améliorées pour lesquels on espère un gain de 30% sur le volume (Groupe pin maritime du futur 2002) permet d'accroître la fixation annuelle de C à l'ha.

L'évolution de la surface boisée constitue un autre pilier du stockage de C en forêt. Des facteurs externes (économiques, pression urbaine, PAC) conduiront-ils à une diminution ou une augmentation de la surface boisée sur le massif landais ?

Enfin, les modifications du milieu naturel affectent la santé, la vitalité et la productivité des arbres et, par conséquent le bilan de C d'un massif.

Les risques liés au vent, aux maladies et ravageurs et aux feux de forêt seront-ils amplifiés avec les changements climatiques annoncés ? Leurs impacts seront-ils également croissants ?

Des travaux récents (Carbofor, 2004) qui visaient à modéliser les impacts d'un changement climatique régionalisé ont montré que la productivité moyenne des pins maritimes sur le massif landais progresserait jusque vers le milieu du siècle, avant de décroître dramatiquement en raison du déficit hydrique. Cependant, **les travaux CARBOFOR ont montré l'existence d'interactions entre les impacts du climat et la gestion.** Une évaluation des facteurs limitants du milieu (richesse en éléments minéraux, disponibilité en eau) doit conduire les gestionnaires à préciser les modes de gestion les plus adaptés pour le maintien de l'assimilation de C par les arbres.

Avant d'intégrer les impacts attendus des changements climatiques dans la définition de stratégies sylvicoles et de politiques d'aménagement du territoire visant à accroître le rôle des forêts aquitaines dans la lutte contre l'effet de serre, il est nécessaire d'évaluer la pertinence technique et socio-économique des scénarios proposés. Il est aussi indispensable d'évaluer la fréquence et l'intensité dans le futur des risques biotiques (maladies, ravageurs) et abiotiques (feux de forêt, tempête).

4.3.2. *Gestion des stocks de carbone des sols forestiers*

- Vers la définition de stratégies de stockage de C dans les sols

Les résultats montrent que les sols forestiers aquitains (0-30 cm) séquestrent à peu près autant de C que la biomasse ligneuse, soit environ 100 MtC.

Par conséquent, dans une stratégie globale de promotion du rôle des forêts dans la lutte contre les changements climatiques, il s'avère fondamental d'évaluer les impacts des orientations sylvicoles et des pratiques de gestion sur le niveau de stock et sur le stockage additionnel de C (i) dans la biomasse ligneuse et (ii) dans les sols. D'autant que les variations du stock de C des sols s'accompagnent à long terme (Garten 1999) d'effets sur la fertilité stationnelle (structure des sols, hydrologie, nutrition des plantes) et donc sur le niveau d'assimilation de CO₂ par la biomasse. Il s'agit alors d'élaborer des stratégies sylvicoles et des pratiques de gestion qui veillent également à la conservation des stocks de C dans les sols.

L'INRA a déjà initié cette démarche pour les sols agricoles à la demande du MEDD. Un travail d'expertise scientifique a été réalisé autour de la question « stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? ». Le rapport (Arrouays, 2002) présente les résultats de simulations de stockage de C dans les sols pour divers scénarios mettant en œuvre des pratiques jugées « stockantes » (travail simplifié du sol, enherbement des cultures pérennes, cultures intercalaires, engrais verts, etc.). La faisabilité agronomique et économique des différents scénarios y est discutée, ainsi que les perspectives de stockage à long terme des pratiques qui sont recommandées. Ces résultats concernent les sols agricoles. Ce type d'analyse n'a pas encore été initié pour ce qui concerne le stockage de C dans les sols forestiers.

- Impact des pratiques sylvicoles

Trichet (1999) décrit l'impact des différentes étapes de l'itinéraire technique de la ligniculture du pin maritime sur les stocks de matière organique des sols landais. **Malgré le nombre d'études encore limité sur le sujet, l'auteur met en avant certaines opérations critiques en ce qui concerne la minéralisation et le drainage des matières organiques.** Il s'agit :

(i) **Des opération associées à un travail du sol** (labour, enfouissement des résidus d'exploitation, désherbage mécanique, dessouchage). Jolivet (2000) montre ainsi une décroissance rapide des matières organiques grossières lors du travail du sol après une coupe rase.

(ii) **Des travaux d'assainissement des parcelles forestières** qui, en désengorgeant les sols au printemps et en automne, contribuent à stimuler l'activité biologique des sols.

Bien que les impacts sur les sols des différentes opérations pratiquées dans le cadre de la ligniculture du pin maritime ne soient pas encore parfaitement connus, **il ressort qu'en lien avec le raccourcissement des rotations, une fréquence accrue (i) du travail du sol et (ii) des niveaux de prélèvements sur la biomasse modifierait de manière significative le bilan de C et la fertilité des sols.**

Enfin, des travaux en cours pourraient apporter prochainement des éléments de réflexions supplémentaires. Depuis 2000 l'INRA de Pierroton suit (i) les échanges de C entre l'écosystème et l'atmosphère, et (ii) l'évolution du stock de C du sol et des humus sur la coupe rase de Bilos en Gironde. Elle a été reboisée début 2004 après les travaux du sol prévus dans un schéma standard de sylviculture du pin maritime. L'analyse des résultats devrait fournir des éléments importants pour la compréhension et la quantification des impacts des travaux de préparation du sol sur la dynamique de stockage de C dans les sols.

- Impacts des changements climatiques

Il est encore difficile d'évaluer avec une précision satisfaisante les impacts à long terme des modifications du climat sur le bilan de C des sols aquitains et landais. Aujourd'hui les principaux facteurs limitant sont (i) le nombre restreint d'échantillons de mesures et de répétitions nécessaires pour bâtir des modèles robustes, (ii) les connaissances encore imparfaites sur la dynamique de la matière organique des sols et le rôle des variables climatiques dans cette dynamique, et (iii) les incertitudes sur les scénarios climatiques futurs.

C. Evaluation des stocks de carbone dans les autres compartiments de l'écosystème

1. Approches internationales

L'évaluation des masses de C séquestrées dans la nécromasse (bois mort au sol, bois mort sur pied et litière) et dans la végétation herbacée du sous-bois n'est pas requise pour renseigner l'indicateur de gestion durable sur les stocks de C (processus d'Helsinki, Vienne 2003). Dupouey (1999) a toutefois montré sur la base d'une analyse bibliographique que la contribution de ces compartiments au stock total de C des forêts française n'est pas négligeable. Elle s'élève à 8%, dont 6% dans la litière.

La décision du processus d'Helsinki de ne pas tenir compte des stocks de C dans la nécromasse et dans la végétation annuelle du sous-bois repose sur une hypothèse de l'IPCC qui considère comme nul le flux de C à long terme dans ces compartiments, au niveau régional et dans un système à l'équilibre.

En effet, pour la litière (feuilles, brindilles et humus) et le bois mort, les apports de C dans ce compartiment sont fonctions de la quantité de biomasse ligneuse sur pied. Ainsi une évolution du niveau de stock de C dans la biomasse ligneuse se répercute de manière proportionnelle dans les stocks de C de la nécromasse. Par conséquent les flux de C dans la nécromasse sont intégrés dans ceux de la biomasse ligneuse. Cette hypothèse peut également être considérée comme vraie pour la végétation annuelle du sous-bois à condition d'une approche régionale et du maintien de la répartition des peuplements forestiers par classes d'âge.

Globalement cette hypothèse est vraie dans le cas d'un système à l'équilibre. Or les pratiques sylvicoles et les variations du climat contribuent à modifier la dynamique de stockage / déstockage de C. Par exemple on peut supposer des pertes de C par drainage plus importantes en lien avec le labour des sols forestiers, et aussi une minéralisation accrue de la nécromasse du fait d'une température à la hausse. C'est pourquoi l'IPCC recommande d'évaluer les flux dans ces compartiments pour les approches de rapportage à l'UNFCCC les plus précises.

2. Approche locale

Une recherche bibliographique à l'échelle nationale nous a conduit à ne pas évaluer les stocks de C dans le bois mort, dans la végétation du sous-bois et dans la litière des forêts d'Aquitaine.

Deux raisons ont motivé ce choix : (1) par défaut ces compartiments ne contribuent pas aux flux de C de l'écosystème, et (2) les données de l'IFN ne permettent pas d'évaluer directement la biomasse dans ces compartiments :

(i) Les données relevées sur le bois mort en forêt par l'IFN sont incomplètes. Seul le volume des arbres morts pied et des chablis de moins de 5 ans dont le diamètre au niveau de la souche dépasse 35 cm est inventorié.

Or le bois mort sous ses autres formes (au sol, sur pied) représente parfois une part non négligeable du bois mort total de l'écosystème puisque Hamza (2004) l'a estimé à 80%. Compte tenu des nouveaux enjeux associés à l'évaluation de ce compartiment (carbone, biodiversité), l'IFN pourrait mettre en place prochainement un protocole d'inventaire spécifique.

(ii) L'IFN relève sur chaque point d'inventaire la nature de l'humus et le nombre de couches. Cependant aucun prélèvement n'est effectué pour permettre une analyse au laboratoire de la teneur en C de la matière organique et de la densité de la matière organique.

(iii) Le volume du sous-bois composé des petits ligneux (houx, buis, bruyère, etc.), des plantes herbacées et des mousses n'est pas évalué. Par contre le couvert relatif au sol par essence est levé.

Il est envisageable à partir des typologies de stations existantes d'établir des modèles de variation des biomasses de litière et du sous-bois. Des collaborations entre l'IFN et la recherche pourraient déboucher sur l'estimation du volume et de la masse de C correspondante par types de stations forestières. Ainsi, les données de l'IFN seraient à la base d'une évaluation nationale du stock de C dans les humus et la végétation du sous-bois.

D. Vers l'établissement du bilan de carbone de la filière forêt-bois landaise

Ce travail a fait l'objet du stage de fin d'études de Caroline Fourcade (avril / septembre 2004) pour l'obtention du titre d'ingénieur des techniques agricoles de l'ENITA²⁹ de Clermont-Ferrand. L'échelon de Bordeaux de l'IFN et le CRPF Aquitaine ont co-encadré les travaux.

Un mémoire a été édité en octobre 2004. Il s'intitule : « Bilan de carbone de la filière forêt-bois landaise : les enjeux méthodologiques, politiques et économiques ». Par conséquent nous présentons ici une synthèse des enjeux, de la méthode mise en œuvre et des principales conclusions de l'étude. Nous renvoyons vers le mémoire pour le détail des protocoles et des hypothèses de calcul.

1. Les enjeux et les questions posées

1.1 Enjeux de l'établissement du bilan de carbone de la filière forêt-bois landaise

L'étude du flux de C de la futaie régulière de pins maritimes landais sur la période 1988-1999 montre qu'elle constitue un puits de C dans la biomasse ligneuse de l'ordre de +0,35 MtC/an pour un rythme d'exploitation « normal » du massif.

Le stockage additionnel de C dans la biomasse s'explique principalement par l'accroissement du volume de bois sur pied moyen à l'ha (+7% entre 1988 et 1999) en lien avec (1) l'arrivée à maturité des peuplements reboisés après les grands incendies des années 1940, et (2) un gain de productivité moyen estimé à 125% depuis 1960 (Loustau, 1997).

Dans le même temps les prélèvements sur la ressource de pin maritime progressaient d'environ 23% depuis 1979 (figure 11) pour atteindre 7,55 Mm³ en 1999 (EAB³⁰ 2001).

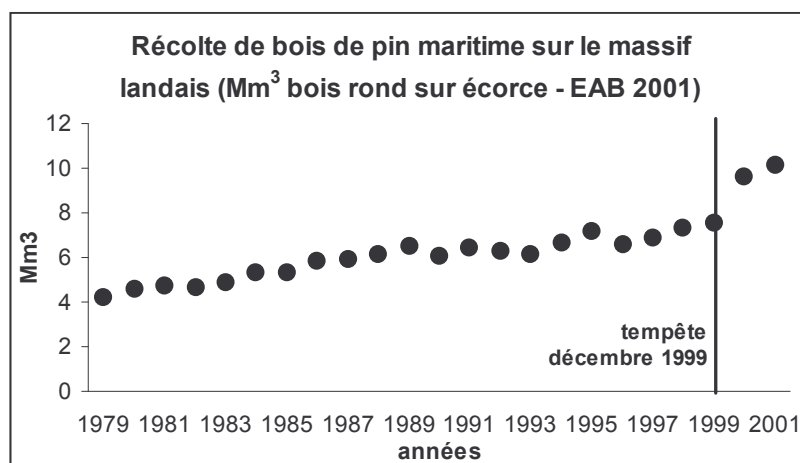


Figure 11 : évolution 1979-2001 de la récolte de bois de pin maritime dans les départements 33, 40 et 47 (A partir de EAB 2001)

²⁹ ENITA : Ecole Nationale d'Ingénieurs des Techniques Agricoles

³⁰ EAB : Enquête Annuelle de Branche

Il apparaît dès lors que la contribution du secteur forêt-bois landais à la séquestration de C ne se limite au seul stockage en forêt. Il participe également au stockage de C hors forêt, dans les produits bois qu'il commercialise. En effet, le C immobilisé dans le bois des arbres récoltés en forêt est pérennisé dans les différents produits que la filière met en œuvre.

Mais l'accroissement des prélèvements de bois dans le cadre d'une sylviculture intensive s'accompagne nécessairement d'une augmentation du niveau global des émissions de C (Ford-Robertson, 1996) pour la production, l'exploitation, la transformation des produits, le transport, etc.

Par conséquent, l'évaluation du rôle de l'activité forestière pratiquée sur le massif landais dans la séquestration de C doit se faire dans une approche filière, c'est-à-dire en intégrant les flux en forêt, dans les produits bois et les émissions du secteur.

Un bilan de C positif pour la filière lui ouvrirait éventuellement droit à une rétribution de la part de l'Etat pour le service rendu dans l'accomplissement des engagements nationaux au protocole de Kyoto. L'aide de l'Etat pourrait par exemple prendre la forme de subventions pour des installations en faveur de la protection des forêts contre les incendies. A notre connaissance aucune discussion n'est encore engagée sur ce point au niveau national.

Mais à plus court terme un bilan positif servirait aussi d'argument commercial pour la vente des bois PEFC. En effet, dans une démarche visant à lutter contre les changements climatiques, en plus de favoriser le stockage en forêt, il est important de promouvoir l'utilisation du bois pour 2 raisons : (i) l'usage du bois comme combustible permet d'éviter la combustion d'énergie fossile, et (ii) le bois dans la construction se substitue aux matériaux à fort intrant en C fossile (acier, PVC, etc.).

1.2. Approches méthodologiques dans les processus internationaux

L'UNFCCC permet aux états signataires de rapporter sur le stock de C dans les produits forestiers récoltés (*harvested wood products*) à condition qu'ils démontrent qu'il s'agit d'un puits de C sur le long terme.

En effet, l'IPCC souligne le risque de non-permanence du stock de C dans les produits forestiers en lien avec les stratégies technico-économiques des acteurs. Les débats sur cette question n'ont pas encore été menés à leurs termes. D'autres questions d'ordre méthodologique sont également posées puisqu'il s'agit d'évaluer les stocks de C dans les produits selon une méthode transparente et transposable dans chaque état signataire.

Face à ces questions, l'IPCC recommande la mise en œuvre d'études nationales pour préciser les méthodes d'évaluation et les connaissances sur les facteurs économiques et techniques de variation du stockage de C dans les produits bois.

Avant qu'une décision politique ne soit définitivement arrêtée sur ce point, l'IPCC considère que les produits forestiers ne constituent pas un stock de C. Par conséquent, le stockage de C dans les produits bois n'est pas éligible dans le cadre de la première période d'engagement protocole de Kyoto (2008-2012).

Les processus internationaux pour la gestion durable des forêts abordent également la question de l'évaluation du stockage de C dans les produits forestiers.

Alors que la résolution de Vienne n°5 adoptée en 2003 par le processus d'Helsinki ouvre la porte à des études pilotes visant à démontrer la pertinence du développement d'un système de comptabilité du stockage de C par les produits bois, les Canadiens l'ont quant à eux déjà intégré dans leurs critères de gestion durable des forêts parus en 2003. Au Canada, outre le renseignement des indicateurs sur le stock de C dans la biomasse ligneuse et dans les sols, ils convient de d'évaluer 2 nouveaux indicateurs : (i) le stock de C dans les produits bois récoltés, et (ii) les émissions de C de la filière forêt-bois. Les Canadiens pourront ainsi évaluer le bilan net de C de leurs secteurs forêt-bois nationaux et provinciaux.

1.3. Etudes pilotes pour démontrer le rôle de puits de carbone des produits bois

Certains travaux sont engagés pour démontrer l'avantage de l'extension de l'éligibilité de la séquestration forestière de C aux produits bois.

Une étude pilote (Norveto, 2003) a mis au point une méthode de calcul du bilan de C pour le secteur des plantations d'Argentine. Les résultats montrent qu'actuellement le bilan de C d'une filière forêt-bois dynamique et bien structurée est positif.

En France, une étude coordonnée par le CTBA³¹ (2003) dans le cadre du programme de recherche GICC³² a conduit à la mise au point d'une méthode de quantification fiable et reproductible au niveau international des stocks de C dans les produits bois. Une approche par filière a été développée. Le facteur d'incertitude le plus important dans cette méthode est l'évaluation de la durée de vie moyenne de chaque catégorie de produits. **Le stock dans les produits bois mis en œuvre au niveau national est estimé à 94,3 MtC en 1998.**

L'étude a également permis de démontrer la permanence au cours des années 90 du caractère de puits de C des produits bois en France, justifiant le besoin de les rendre éligibles dans le cadre d'une 2^{ème} phase du protocole de Kyoto. **Un accroissement de 9% du stock de C dans les produits bois nationaux est mesuré sur la période 1990-1998.**

Enfin, les auteurs précisent que des travaux futurs devraient contribuer à mieux connaître les facteurs techniques et économiques qui déterminent les comportements de stockage des acteurs.

2. Objectifs de l'étude au niveau des Landes de Gascogne

L'objectif de l'étude est de contribuer à la mise au point d'une méthode fiable, reproductible et basée sur des données collectées auprès des acteurs locaux, pour l'évaluation du bilan de C de la filière forêt-bois landaise.

Pour cela, outre la quantification du stockage de C en forêt (§ B.4.1), il s'agit de développer un protocole de calcul (i) des stocks et des flux de C dans les produits bois de pin maritime, et (ii) des émissions de la filière forêt-bois landaise générées au cours des opérations sylvicoles, de l'exploitation, du transport et de la transformation.

³¹ CTBA : Centre Technique du Bois et de l'Ameublement

³² GICC : Gestion et Impacts du Changement Climatique / Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

Les premiers résultats doivent permettre de juger du caractère de puits ou de source de C du massif landais au cours des années 1990. Ils serviront également à évaluer différentes stratégies de stockage des acteurs.

3. Méthodes mises en œuvre au niveau du massif landais

3.1. Equation pour le calcul du bilan de carbone de la filière forêt-bois landaise

Des travaux antérieurs se sont basés sur l'équation générale (4) pour le calcul du bilan de C de filières forêt-bois intensives. Elle a été mise en œuvre dans le contexte des plantations forestières industrielles de Nouvelle Zélande (Ford Robertson, 1996) et d'Argentine (Norverto, 2003). Elle s'applique également au système forêt-bois landais basé sur la culture intensive du pin maritime en futaie régulière.

$$(4) \quad C_{(t2-t1)} = \Delta F_{(t2-t1)} + \Delta B_{(t2-t1)} - \sum_{(t1,t2)} E$$

Où $C_{(t2-t1)}$ = Bilan de C de la filière forêt bois sur la période [t1,t2] (en tC)
 $\Delta F_{(t2-t1)}$ = Flux de C de l'écosystème forestier sur la période [t1,t2] (en tC)
 $\Delta B_{(t2-t1)}$ = Flux de C dans les produits bois sur la période [t1,t2] (en tC)
 $\sum_{(t1,t2)} E$ = Emissions de C de la filière forêt bois sur la période [t1,t2] (en tC)

3.2. Evaluation des stocks et flux de carbone dans la futaie de pin maritime

Le flux de C dans la futaie régulière de pin maritime est calculé sur la base des résultats des inventaires moyens 1988, 1999 et 2000 sur le massif landais.

La méthode mise en œuvre consiste à comparer les stocks de C dans la biomasse sur pied entre les 3 dates disponibles. Les stocks de C sont estimés à l'aide des coefficients multiplicateurs spécifiques aux pins maritimes en futaie régulière (approche par les facteurs d'expansion de biomasse totale) appliqués au volume de bois fort ventilé par classe d'âge (§ B.2.5).

Les données utilisées dans l'étude pour l'évaluation des stocks de C dans les sols ne permettent pas d'estimer les variations de stocks dans ce compartiment (§ B.3.3). D'autre part, nous avons considéré que les autres compartiments de l'écosystème (litière, humus, bois mort et végétation du sous-bois) n'interviennent pas dans le flux de C de l'écosystème, conformément à l'hypothèse de l'IPCC (§ C).

Par conséquent, le terme « flux de C de l'écosystème forestier » n'intègre que les flux dans la biomasse des pins.

3.3. Evaluation des stocks et flux de carbone dans les produits bois

3.3.1. Protocole régional pour le calcul des stocks dans les produits bois

Les travaux du CTBA (2003) ont montré la fiabilité d'une approche par filières de transformation pour l'évaluation des stocks dans les produits bois en France.

Le protocole consiste à ventiler le volume de bois fort récolté chaque année dans les 5 filières de transformation : (1) construction, (2) ameublement, (3) emballage, (4) papiers/cartons et (5) bois énergie. Au niveau du massif landais, les EAB nous ont renseigné sur les quantités de bois récoltées en 1990, 1998 et 2001 dans les 3 départements du massif landais (figure 12).

Les résultats sont ventilés par filières sur la base des résultats d'une enquête réalisée à l'échelle du massif (Malfait 2003).

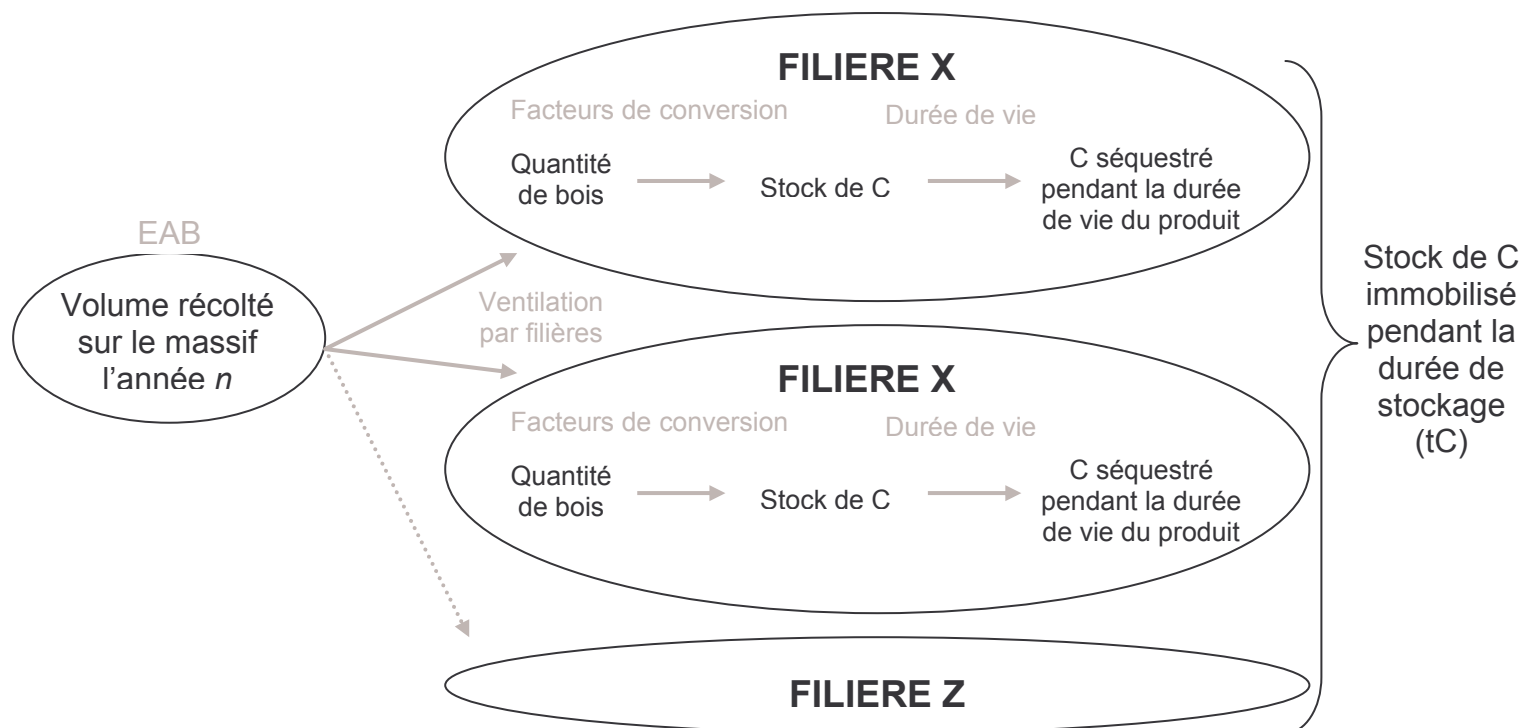


Figure 12 : Protocole de calcul du stock de C dans les produits bois de pin maritime sur le massif landais
En gris : données et expertises nécessaires

Au niveau de chaque filière, des coefficients fournis par le CTBA et l'AFOCEL ont permis de convertir des quantités (volume sur/sous écorce, tonne de papier, volume de sciage, etc.) en masse de C dans le bois rond sur écorce.

Ensuite, une durée de vie moyenne est associée à chaque produit selon sa filière de rattachement (figure 13). Elle est évaluée à dire d'expert et appliquée à tous les types de produits regroupés par filières.

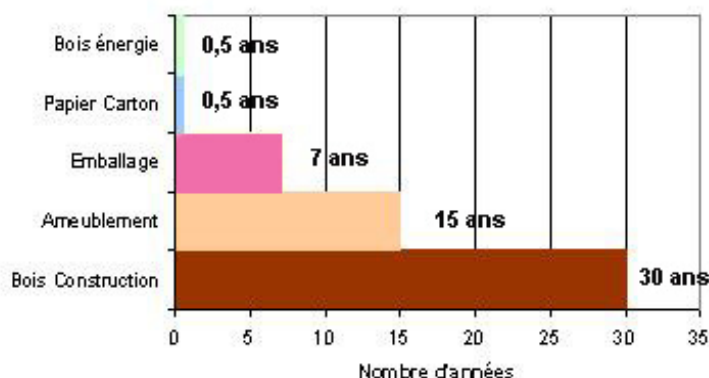


Figure 13 : Durée de vie moyenne des produits bois par filières (CTBA, 2003)

Il est possible par conséquent de calculer pour une année (i) donnée la quantité de C séquestrée dans tous les produits bois de pin maritime présents sur le marché ainsi que (ii) la durée moyenne de stockage d'une tonne de C récoltée cette année.

3.3.2. *Evaluation de la dynamique de stockage dans les produits bois*

La mise en parallèle sur la période 1990-1998 (i) des quantités de stocks de C constitués chaque année dans les produits bois et (ii) de la durée de stockage moyenne d'une tonne de C permet d'évaluer la dynamique de stockage hors forêt pour un fonctionnement « normal » du massif. La même approche sur la période 1990-2001 renseigne sur la dynamique de stockage en intégrant les conséquences d'un événement climatique exceptionnel.

3.4. Estimation des émissions de carbone de la filière forêt-bois landaise

Le troisième terme intervenant dans l'établissement du bilan de C de la filière forêt-bois landaise est l'évaluation de ses émissions de C ($E_{\text{filière}}$). Elles ont 4 origines (5):

$$(5) \quad E_{\text{filière}} = E_{\text{exploitation}} + E_{\text{transformation}} + E_{\text{transport}} + E_{\text{fin de vie}}$$

1. La sylviculture et l'exploitation forestière ($E_{\text{exploitation}}$)
Sylviculture : drainage, débroussaillage, labour, fertilisation, plantation, semis
Exploitation forestière : abattage, débardage, chargement
2. La transformation et la mise en forme ($E_{\text{transformation}}$)
3. La distribution et les transports des biens ($E_{\text{transport}}$)
4. L'utilisation et la fin de vie des produits ($E_{\text{fin de vie}}$)

La comptabilité rigoureuse de toutes les émissions de C de la filière est une opération complexe en raison de l'hétérogénéité des données disponibles ou parfois même de leur inexistence. Des approches ACV³³ développées par la recherche permettent de faire progresser les connaissances pour certains produits (CTBA, 2004). Ces résultats ponctuels sont souvent extrapolés pour estimer les émissions totales de C des filières forêt-bois.

Dans l'étude à l'échelle du massif landais, les seules émissions de C associées à l'exploitation, à une partie des transports, et à l'activité des scieries ont été estimées.

La quantité de C émise est évaluée en convertissant les volumes de fuel consommés en masse de C par l'emploi de coefficients énergétiques. Les consommations de fuel ont été estimées à partir des volumes de bois transformés.

4. Principaux résultats de l'étude

4.1. Stocks et flux de carbone dans les produits bois de pin maritime

Conjointement avec la hausse du volume prélevé chaque année sur le massif, Fourcade (2004) estime que la quantité de C exportée chaque année hors forêt passe de 1,42 MtC³⁴ en 1990 à 1,69 MtC en 1998, puis à 2,16 MtC en 2001 compte tenu de l'exploitation des chablis (figure 14).

³³ ACV : Analyse de Cycle de Vie d'un produit

³⁴ 1 tonne de C = 3,67 tonnes de CO₂

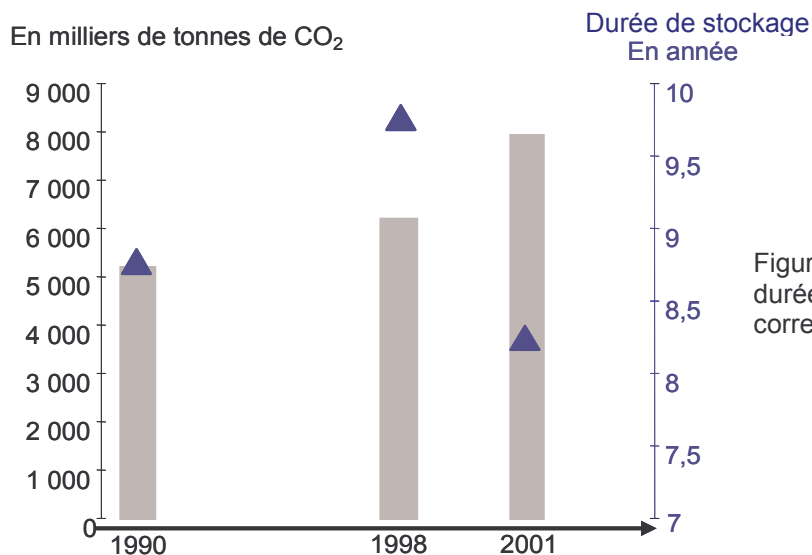


Figure 14 : récolte de bois en équivalent CO₂ et durée de stockage de la tonne de CO₂ correspondante

Dans le même temps, la durée moyenne de stockage du C hors forêt passe de 8,8 ans en 1990 à 9,8 ans en 1998, puis à 8,3 ans en 2001 (figure 14).

Cette évolution est fonction de la proportion de bois destinés aux filières construction et ameublement qui présentent les durées de vie les plus longues. Elle croît entre 1990 (30%) et 1998 (35%), avant de chuter en 2001 (28%) en raison d'une destination majorée vers la filière papiers/cartons dont les produits sont caractérisés par une durée de vie courte (le recyclage n'est pas pris en compte dans l'étude).

Le stock de C constitué dans tous les produits bois de pin maritime mis en œuvre progresse sur toute la période 1990-2001, faisant des produits bois une forme de stockage croissante de C (figure 15).

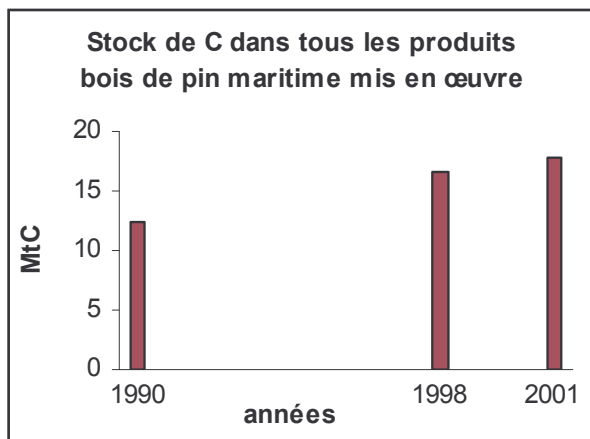


Figure 15 : Evolution du stock de C dans les produits bois hors forêt (en MtC)

Il passe de 12,45 MtC en 1990 à 16,52 MtC en 1998 en raison de la quantité supplémentaire de C exportée chaque année hors forêt et d'une durée de stockage moyenne du C majorée d'une année. L'accroissement sur la période de 32,7% du stock de C dans les produits bois de pin maritime est bien supérieur à celui observé au niveau national (+9%). La contribution des produits bois de pin maritime au stock national de C dans les produits bois passe ainsi de 14,4 à 17,5% entre 1990 et 1998, en lien avec une hausse relative plus importante du niveau des prélèvements sur la ressource et une durée de stockage majorée.

Entre 1998 et 2001, malgré une réduction importante de la durée moyenne de stockage du C de 1,5 ans, le stock hors forêt progresse encore. Il est de 17,86 MtC en 2001 du fait du volume exceptionnel transformé cette année.

Par conséquent, sur la période 1990-1998 considérée comme « normale » pour ce qui concerne l'exploitation du massif, le stockage additionnel de C dans les produits bois de pin maritime mis en œuvre est positif, de l'ordre de +0,51 MtC/an en moyenne (tableau 12). **Les produits bois de pin maritime représentent un puits de C important, supérieur à celui constitué dans la biomasse ligneuse (+0,35 MtC/an).** Ce puits de C dans les produits bois de pin maritime participe pour 52,6% à celui mesuré par le CTBA au niveau national sur la même période (+0,97 MtC/an). Il traduit la contribution majeure de la filière forêt-bois landaise au dynamisme du secteur bois national.

	PERIODES		
	1990-1998	1990-2001	1998-2001
Stockage additionnel hors forêt (MtC/an)	+0.51	+0.49	+0.45
Durée moyenne de stockage du C (an)	+1.0	-0.5	-1.5

Tableau 12 : stockage additionnel de C dans produits bois et durée moyenne de stockage associée

Si l'intégration des conséquences d'un événement climatique exceptionnel dans le bilan de C de la biomasse ligneuse des pins maritimes conduisait à une décapitalisation de l'ordre de -0,34 MtC/an, le bilan dans les produits bois progressait quant à lui de +0,49 MtC/an en moyenne sur une période comparable.

Finalement, l'activité forestière du massif landais a permis la séquestration additionnelle de 0,86 MtC/an en moyenne au cours des années 90. Elle demeure positive de +0,15 MtC/an en intégrant les effets tempête (tableau 13).

	Avant tempête	Avec effets tempête
BIOMASSE LIGNEUSE	+0,35 MtC/an	-0,34 MtC/an
PRODUITS BOIS	+0,51 MtC/an	+0,49 MtC/an
FILIERE	+0,86 MtC/an	+0,15 MtC/an

Tableau 13 : bilan partiel de C dans la filière forêt-bois de pin maritime des Landes de Gascogne

4.2. Contribution des produits bois dans le stock de carbone de la filière landaise

Parmi les pools de C associés à l'activité forêt-bois landaise, ceux constitués dans la biomasse ligneuse et dans les produits bois sont susceptibles d'évoluer le plus rapidement en réponse aux stratégies des acteurs : intensification/extensification de la sylviculture, promotion de certaines filières, développement de matériaux innovants, etc.

La contribution des produits bois à ces stocks a fortement progressé pour en représenter près du 1/3 en 1998 (tableau 14). Deux facteurs contribuent à expliquer cette évolution : (i) un taux de prélèvement sur la production annuelle en hausse, de 74,6% en 1988 à 83,3% en 1999 (PEFC Aquitaine, 2001), et (ii) une destination renforcée vers les filières offrant les durées de vie les plus longues.

Années moyennes	Stock C produits (MtC)	Stock C biomasse ligneuse (MtC)	Stock C total (MtC)	Contribution des produits
1988-1990	12,45	45,08	57,53	28%
1998-1999	16,52	48,93	65,45	34%
2000-2001	17,86	41,36	59,22	43%

Tableau 14 : évolution de la contribution des produits au stock de C total

La contribution des produits bois au stock de C de la filière forêt-bois landaise est très supérieure à la valeur nationale établie à 9,6% sur la base des travaux du CTBA (2003) et de l'IFN (Carbofor, 2004). Elle souligne l'importance des stocks dans les produits bois au sein d'un massif orienté vers la production soutenue de bois.

4.3. Emissions de carbone de l'activité forestière

Toutefois, le traitement supplémentaire de bois s'est accompagné fort logiquement d'une hausse des émissions de la filière. Celles-ci n'ayant fait l'objet que d'une estimation partielle, elles n'ont pas été intégrées dans notre bilan de filière.

A titre d'illustration, les émissions générées par l'exploitation forestière ont progressé de 30% entre 1999 et 2001. Cette hausse s'explique par le développement significatif de la mécanisation pour permettre le nettoyage rapide des parcelles ravagées par la tempête (figure 16). Fourcade a également constaté une hausse des émissions liées au transport et à la transformation des bois.

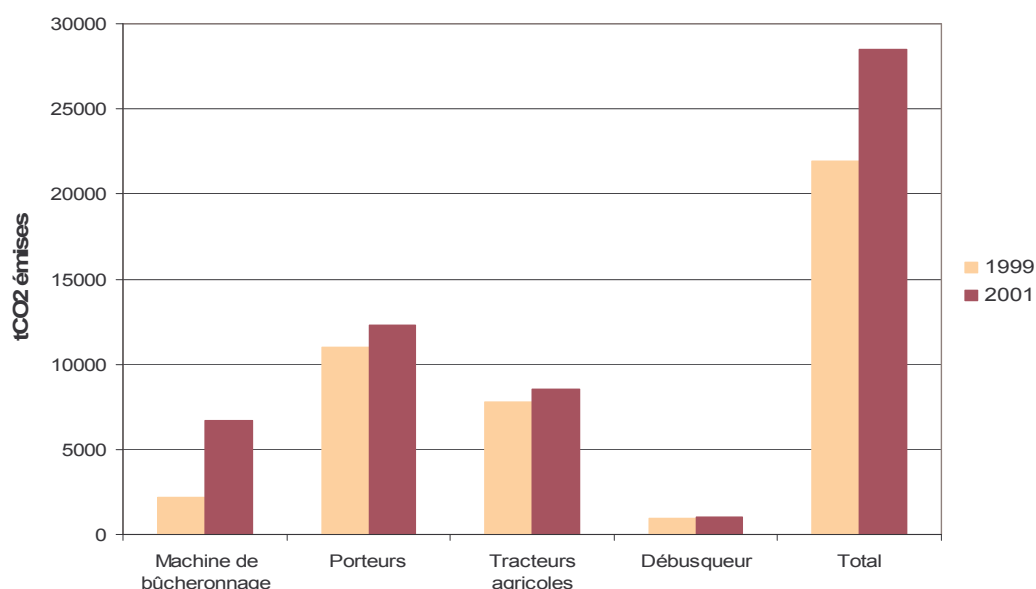


Figure 16 : Les émissions de CO₂ générées par l'exploitation forestière

4.4. Impacts des stratégies de stockage des acteurs

Une étude complémentaire développée dans une approche prospective a permis de préciser l'impact de différentes stratégies des acteurs de la filière bois sur le stock et les flux de C dans les produits bois.

Il s'agissait d'évaluer la durée moyenne de stockage et le niveau de stock dans les produits mis en œuvre pour 2 scénarios de répartition des bois entre les différentes filières à l'horizon 2010. L'estimation de récolte de la ressource ligneuse de pin maritime à cette échéance est de 6,9 Mm³ (IFN 2002).

Le premier scénario est dit de « référence ». Il considère en 2010 une ventilation des produits par filières identique à celle de 1999. Cette hypothèse ne tient pas compte de la disponibilité attendue par catégories de petits/moyens/gros bois en 2010.

Le second scénario est dit « tendanciel ». Il s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre en 2010 de l'accord cadre sur le bois dans le construction (loi sur l'air, 1996).

Indépendamment des catégories de bois disponibles en 2010, l'hypothèse retenue est un versement depuis la filière papiers/cartons vers la filière construction d'un volume correspondant à 25% de la part destinée à la construction en 1999.

On montre que pour un niveau de récolte identique, la mise en œuvre d'une stratégie visant à promouvoir les produits ayant les durées de vie les plus longues (en pratiques les produits aux plus fortes valeurs ajoutées) permet d'accroître de plus de 15% la durée moyenne de stockage de C dans les produits bois. Ce type de stratégie contribue par conséquent à majorer le puits de C dans les produits.

5. Limites de l'approche mise en œuvre et améliorations à envisager

5.1. Les détails techniques sont en cours de discussion au niveau national

Bien que les méthodes mises en œuvre dans cette étude soient basées sur des recommandations nationales et internationales, la problématique de l'évaluation de la contribution des secteurs forêt-bois au stockage de C est récente. Ainsi, les recommandations de l'IPCC pour la comptabilité dans le cadre de l'UNFCCC et du protocole de Kyoto des stocks et des flux de C du secteur LULUCF ont été publiées au début 2004.

Par conséquent, la plupart des arbitrages politiques et techniques n'ont pas encore été pris à ce jour, au niveau international comme aux niveaux nationaux. En France, les ministères concernés se sont engagés à arrêter leurs décisions pour les rapports concernant l'exercice 2007.

Les protocoles mis en œuvre dans cette étude reposent par conséquent sur un certain nombre d'hypothèses. Elles ont été prises en fonction des connaissances actuelles, aux échelles globales et locales. Ainsi, bien qu'il soit nécessaire d'apporter des améliorations aux protocoles, le travail réalisé ici constitue une première approche de l'évaluation globale du bilan de C du secteur forêt-bois landais.

5.2. Pistes pour dresser le bilan de carbone complet du secteur forêt-bois

Les principales pistes d'amélioration du bilan de C dans une approche filière concernent à la fois (i) **l'acquisition de connaissances nouvelles** et (ii) **l'accès aux données qui peuvent être hétérogènes et parfois incomplètes.**

5.2.1. Au niveau de l'évaluation du stockage de carbone en forêt

L'évaluation des stocks et des flux de C dans la biomasse des arbres repose sur des méthodes et des données qui sont globalement fiables. Les principales sources d'amélioration attendues pour le calcul des stocks et des flux de C dans ce compartiment concernent (i) l'actualisation des coefficients de conversion des données IFN en biomasse ligneuse totale puis en masse de C et (ii) la fréquence de la fourniture des résultats d'inventaire.

A l'inverse, l'évaluation des flux de C des sols, de la litière et dans la biomasse de la végétation non recensée par l'IFN n'a pas été abordée faute de données fiables ou disponibles à ce jour. Des collaborations entre la recherche et l'IFN permettraient d'évaluer ces grandeurs par types de stations forestières et d'étudier la possibilité technique d'extrapoler les résultats à l'ensemble du territoire national à partir des résultats d'inventaire.

5.2.2. Au niveau de l'évaluation du stockage de carbone dans les produits bois

Les travaux du CTBA (2003) ont validé un protocole de calcul des stocks et des flux de C dans les produits bois. Il s'agit de comptabiliser les quantités traitées chaque année par les différentes filières de transformation et d'associer à chaque catégorie de produits une durée de vie spécifique. Par conséquent la fiabilité de la méthode repose sur la connaissance (i) de la ventilation des volumes traités par filières, et (ii) de la durée de vie moyenne de chaque produit mis en œuvre.

Or il se révèle complexe d'établir un schéma robuste des flux de matières (sciages, plaquettes, sciures, etc.) entre les différentes filières à partir des statistiques disponibles. C'est particulièrement vrai pour les produits connexes dont les provenances sont variées (scieries, papeteries, etc.) et les usages multiples (production d'énergie, fabrication de panneaux, etc.).

Une perspective d'amélioration de la connaissance du flux de produits au sein de la filière bois landaise consisterait à développer une enquête auprès d'un échantillon d'agents économiques représentatifs du secteur pour quantifier les flux de matière qui transitent chaque année dans leur entreprise et pour préciser l'origine et la destination de ces produits.

La connaissance de la durée de vie des produits mis en œuvre représente un facteur d'incertitude majeur dans l'évaluation des stocks et des flux de C constitués dans les produits bois. Des approches monographiques, comme celle conduite pour les contreplaqués à base de pin maritime (CTBA 2003), doivent être poursuivies.

5.2.3. Au niveau de l'évaluation des émissions de C du secteur forêt-bois

Depuis la production de bois en forêt jusqu'à la fin de vie des produits mis en œuvre, les sources d'émissions de C sont nombreuses et les données qui permettraient de les estimer sont hétérogènes ou manquantes. Une approche développée par la recherche consiste à évaluer le bilan environnemental d'un produit bois donné. L'extrapolation des résultats des études ACV par catégories de produits à l'ensemble des volumes traités au niveau régional peut être une approche à développer.

5.2.4. Au niveau des stratégies des acteurs socio-économiques

Enfin, si le stockage de C par le secteur forêt-bois dépend de facteurs anthropiques et liés au milieu naturel, il est nécessaire (i) de développer les connaissances sur les stratégies de réponse des acteurs face à des modifications d'ordres économiques, techniques et climatiques et (ii) d'évaluer leurs impacts sur le stockage de C.

E. Conclusions

1. Les protocoles mis en œuvre

1.1. Indicateur « stock de carbone forestier » du processus d'Helsinki

Les approches méthodologiques développées dans cette étude s'appuient largement (1) sur les recommandations internationales de l'IPCC pour l'évaluation des stocks et des flux de C dans la biomasse ligneuse, et (2) sur des bases de données publiées par la recherche pour ce qui concerne l'évaluation des stocks de C des sols.

Finalement, les protocoles développés dans cette étude permettent d'estimer l'indicateur 1.4 de gestion durable des forêts du processus d'Helsinki.

Les résultats produits en Aquitaine peuvent être comparés aux évaluations qui seront réalisées au niveau d'autres domaines d'études, par exemple dans les 8 autres régions associées au projet FORSEE.

La méthode est reproductible. L'actualisation des résultats d'inventaires (par l'IFN) et des coefficients de conversion (par la recherche) doit conduire à la mise à jour périodique et régionalisée des évaluations de stocks de C dans la biomasse et les sols. Il s'agira alors de confirmer ou d'infirmer la tendance à long terme de puits de C des forêts d'Aquitaine, notamment en fonction des modifications des pratiques de gestion et des changements de productivité liés au milieu naturel.

1.2. Bilan de carbone de l'activité forêt-bois en Aquitaine

Nos résultats montrent que c'est bien l'ensemble de la filière forêt-bois qui participe à la réduction de l'effet de serre anthropique en séquestrant le C en forêt et dans les produits bois. Par ailleurs d'autres études (COST Action E9) ont souligné la contribution indirecte du secteur forêt-bois à la lutte contre les changements climatiques en produisant du bois qui se substitue à des matériaux et énergies émettrices de CO₂.

C'est pourquoi, dans l'objectif de promouvoir le rôle bénéfique du secteur forêt-bois pour le climat, il incombe dans un premier temps de quantifier l'impact global de l'activité forestière sur la teneur en C de l'atmosphère.

Il convient alors d'évaluer les stocks, et surtout les flux, de carbone (1) dans les autres compartiments de l'écosystème : bois mort, litière, humus, sous-bois, et (2) dans les produits bois, bien que l'IPCC et le processus d'Helsinki considèrent par défaut comme nulle leur contribution au flux de C de l'écosystème, principalement en raison de la complexité de leur évaluation.

Et parce que la production, la transformation, le transport et la mise en œuvre du bois s'accompagnent de consommations d'énergies, il convient également de comptabiliser les émissions de C de la filière forêt-bois.

Les approches mises en œuvre dans notre étude permettent d'établir un bilan de carbone partiel de l'activité forêt-bois pratiquée sur le massif des Landes de Gascogne, sur la base à la fois de protocoles développés au niveau national et de méthodes plus empiriques.

Nos résultats contribuent par ailleurs à identifier les principales pistes à développer pour une évaluation complète du bilan de C d'une filière forêt-bois.

D'une part, il est nécessaire dans le cadre des observatoires permanents de la forêt d'évaluer les stocks de C dans les sols, dans les humus et dans le bois mort (ils représentent près des 2/3 du stock de C de l'écosystème) à l'aide de formules de calcul fiables développées en partenariat avec la recherche.

D'autre part, il convient de mieux cerner les flux de matières et d'énergie associés à la vie des produits bois mis en œuvre. Il s'agit alors d'évaluer avec une meilleure précision la durée de stockage du C hors forêt et les émissions entre le moment de la production du bois en forêt et sa minéralisation en fin de vie.

2. Les perspectives pour accroître le rôle de l'activité forêt-bois dans la réduction de l'effet de serre additionnel

2.1. Le caractère de « puits de carbone » de l'activité forestière en Aquitaine

Les résultats de notre étude soulignent la tendance de fond au stockage additionnel de C dans toutes les forêts d'Aquitaine en lien avec : (1) une meilleure productivité des peuplements, (2) l'extension de la surface boisée et (3) des niveaux de prélèvements sur la ressource inférieurs à l'accroissement.

Par ailleurs, nos résultats, partiels car ne prenant pas en compte les émissions de C au cours de la vie des produits bois, montrent que **l'activité forêt-bois sur le massif des Landes de Gascogne représente un puits net de carbone.**

Il apparaît que les conséquences de la tempête de 1999, bien que dramatiques sur les stocks de C en forêt, ne remettent pas fondamentalement en cause le caractère de puits de C des forêts d'Aquitaine. En effet, à court terme la dynamique forte d'accroissement des stocks en forêt permet aux forêts régionales de retrouver leur niveau de stock d'avant tempête grâce à l'activité des sylviculteurs et aux facteurs naturels. **Par conséquent la tempête peut être assimilée à un événement exceptionnel dans la dynamique globale de stockage de C en forêt.**

2.2. Les produits bois, une forme de stockage pérenne du carbone forestier

Des pistes de réflexion viennent d'être ouvertes pour la définition de pratiques sylvicoles visant à limiter les impacts des changements climatiques sur la production forestière (Carbofor, 2004). En effet, la perspective alarmante des conséquences des changements climatiques à long terme et l'éventualité d'une fréquence et d'une intensité accrue des pressions biotiques et abiotiques sur les forêts pourraient inverser la tendance et faire d'elles des sources nettes de carbone.

Ainsi, l'ouragan de 1999, et plus largement les impacts attendus des changements climatiques, conduisent à s'interroger sur la pérennité des stocks constitués en forêt, et par-là même, sur la stratégie optimale pour accroître le rôle du secteur forêt-bois dans la réduction de l'effet de serre anthropique.

Le stockage de C hors forêt dans les produits bois apparaît comme une solution durable.

Nos résultats concernant le massif landais montrent qu'il augmente de manière tendancielle au cours des années 1990. Deux facteurs additionnels expliquent la tendance : l'accroissement de la mobilisation du pin maritime sur la période et une

durée de stockage du C dans les produits plus longue. Nos résultats en région se trouvent corroborés par ceux du CTBA à l'échelle nationale (2003).

Au niveau du massif landais, la tempête de 1999 se traduit logiquement par une augmentation du stockage de C hors forêt. Or cette forme de stockage dépend principalement de facteurs liés aux stratégies des acteurs. Ainsi, on montre qu'une proportion importante de biens à forte valeur ajoutée permet d'accroître la quantité de C séquestrée hors forêt en favorisant la durée de stockage dans les produits bois. La mise en œuvre d'une stratégie dans le sens d'une utilisation accrue des produits à longue durée de vie permettrait alors d'accroître le rôle du secteur forêt-bois dans la lutte contre les changements climatiques.

2.3. Développer l'usage des produits forestiers

Tous ces résultats contribuent à étayer l'argumentaire en faveur de l'extension de l'éligibilité des stocks de C forestiers aux produits bois dans le cadre du protocole de Kyoto. En effet, la question de l'activité forestière comme forme de séquestration de C à long terme fait toujours l'objet de négociations au sein de l'UNFCCC.

Dans ce débat, il apparaît également nécessaire de souligner qu'une option bénéfique à moyen terme pour le climat consiste à accroître la part des produits forestiers dans la construction et dans la production d'énergie renouvelable. Trois raisons peuvent être avancées : (1) ce sont des biens entièrement renouvelables, (2) leur production et leur mise en œuvre requièrent moins d'énergie en comparaison avec les autres matériaux, et (3) l'impact de la combustion de bois issu de forêts gérées sur le cycle du carbone planétaire est nul.

Le rôle bénéfique pour le climat du secteur forêt-bois pourrait alors être qualifié en estimant l'émission évitée de C du fait de l'utilisation du bois.

En France l'usage du bois est encore peu développé pour des raisons culturelles et structurelles en relation avec l'organisation des filières d'approvisionnement.

La quantité supplémentaire de C qui pourrait être séquestrée hors forêt dans les produits bois est potentiellement très importante. En effet, ils ne représentent à ce jour qu'environ 10% des matériaux employés dans la construction. La mise en œuvre dans un premier temps de l'accord cadre sur le bois dans la construction contribuerait à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

La filière bois énergie française reste également à développer, pour des usages particuliers, collectifs et industriels. L'ADEME³⁵ s'y emploie par l'intermédiaire de son plan « Bois énergie » qui prévoit à l'horizon 2006 au niveau national la mobilisation supplémentaire de 3 Mm³ du bois pour des usages énergétiques.

Enfin, la recherche d'une meilleure efficacité énergétique à chaque étape de la vie des produits d'une part, et le développement chez les industriels du bois de l'autoconsommation des connexes et des rémanents d'exploitation pour la production d'énergies d'autre part, auraient des effets positifs sur la réduction de l'effet de serre anthropique.

³⁵ ADEME : Agence pour le Développement et la Maîtrise de l'Energie

BIBLIOGRAPHIE

ARROUAYS D., KICIN JL., PELISSIER P., VION I., 1994. Evolution des stocks de carbone des sols après déforestation : analyse spatio-temporelle à l'échelle d'un paysage pédologique. Etudes et Gestion des Sols. N°2. pp. 29-38.

ARROUAYS D., DESLAIS W., DAROUSSIN J., BALESDENT J. GAILLARD. J., DUPOUEY JL., NYS C., BADEAU V., BELKACEM S., 1999. Stocks de carbone dans les sols de France : quelles estimations ? C. R. Acad. Agric. Fr. vol. 85 n°6, pp 278-292.

ARROUAYS D., DESLAIS W., BADEAU V., 2001. The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France. Soil Use and Management. 17. pp 7-11.

ARROUAYS D., BALESDENT J., GERMON JC., JAYET PA., SOUSSANA JF., STENGEL P., 2002 (eds.). Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective. Rapport (INRA). 334 p.

BALESDENT J. 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. Etudes et gestion des sols. 3(4). pp 245-260.

BALESDENT J., ARROUAYS D., 1999. Usage des terres et stockage de carbone dans les sols du territoire français. Une estimation des flux nets annuels pour la période 1900-1999. C. R. Acad. Agric. Fr. vol. 85 n°6, pp 265-277.

BELKACEM S., NYS C., DUPOUEY JL., 1998. Evaluation des stocks de carbone dans les sols forestiers. Importance de la sylviculture et du milieu sur la variabilité. Rapport INRA/DPE n°6 – 95/329/P00006. Agriges. 68 p.

CARBOFOR. 2004. Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Rapport final du projet. Programme GICC 2001 « Gestion et Impacts du Changement Climatique ». Convention Gip ECOFOR n°3/2001. 136 p.

CHANTAL M., 2001. Estimation du stock de C dans la biomasse de PM du massif landais. Rapport DESS « Environnement et développement sylvicole : gestion de la forêt cultivée ». Univ. Bx IV. 30 p.

CHANTRE G., DA SILVA PEREZ D., 1999. Variabilité naturelle des fibres du pin maritime et conséquences industrielles. Colloque « Pin maritime : de la fibre aux matériaux ». Bordeaux 19 mars 2002. Ed. ARBOFOR. pp. 36-61.

CITEPA. 2003. Rapport d'inventaire national. Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Décembre 2003. Réf. CITEPA 494/Convention MATE 26/ 2001. 307 p.

CLOPPET E., 2002. Impact d'un scénario climatique régionalisé 1960-2100 sur la phénologie et la production primaire de quelques espèces forestières françaises. Rapport de stage élève-Ingénieur de la météorologie. Ecole Nationale de la Météorologie. INRA de Bordeaux Pierroton. 68 p + annexes

CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DES FORETS. 2003. L'aménagement forestier durable au Canada : Critères et indicateurs 2003. 20 p.

CONVENTION CADRE DES NATIONS UNIES SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES. 1992. Nations Unies. <http://unfccc.int>

COST ACTION E9. 1997-2001. Life cycle assessment of forestry and forest products. <http://www.rrz.uni-hamburg.de/cost/e9/>

COURTADE M., 2004. La compartimentation du bois final, du bois juvénile et du bois de compression dans le tronc de *Pinus pinaster*. Rapport de stage MST. Université Bordeaux I. 17 p.

CTBA. 2003. Extension de l'éligibilité de la séquestration forestière du carbone à l'ensemble des stocks de la filière. Rapport Final. Programme de recherche GICC. 148 p.

CTBA. 2004. Analyses de cycle de vie de panneaux contreplaqués. Rapport final. CTBA, ECOBILAN, CIRAD. Financement ADEME, UFC. N. Réf. CTBA / N°690. 74 p.

DUPOUEY JL., PIGNARD G., BADEAU V., THIMONIER A., DHOTE JF., NEPVEU G., BERGES L., AUGUSTO L., BELKACEM S., NYS C., 1999. Stock et flux de carbone dans les forêts françaises. C. R. Acad. Agric. Fr. vol. 85 n°6, pp 293-310.

DUPOUEY JL., PIGNARD G., 2001. Quelques problèmes posés par l'évaluation des stocks et flux de carbone forestiers au niveau national. RFF LIII. 3-4. Numéro spécial 2001. pp 294-300.

FORD-ROBERTSON J., 1996. Estimating the net carbon balance of the plantation forest industry in New Zealand. Biomass and energy vol. 10 n°1. pp 7-10.

FOURCADE C., 2004. Bilan de carbone de la filière forêt-bois landaise : les enjeux méthodologiques, politiques et économiques. Rapport de fin d'étude ENITAC. 80 p.

GARTEN CT., POST WM., *et al.*, 1999. Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. Biogeochemistry. 45(2). pp. 115-145.

GROUPE PIN MARITIME DU FUTUR. 2002. Le progrès génétique en forêt. Avec le soutien financier de l'UE, du Conseil Régional d'Aquitaine et du MAAPAR. 79 p.

HAMZA N., CLUZEAU C., 2004. Evaluation du bois mort en forêt par l'IFN : situation et perspectives d'amélioration. Coll. « bois mort et à cavité : une clé pour des forêts vivantes ». 25-28 oct. 2004. 9 p.

IFN. 2002. Les forêts françaises après les tempêtes de décembre 1999. Dordogne.

IFN. 2003. Massif des Landes de Gascogne, 1998-1999-2000 + résultats après la tempête du 27/12/1999, résultats et commentaires.

IFN. 2003. Buts et méthodes de l'Inventaire Forestier National.

IPCC. 2000. Rapport spécial : Utilisation des Terres, changements d'affectation des terres et foresterie- Résumé à l'intention des décideurs. 23 p.

IPCC. 2001. Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques. Rapport du groupe de travail I du GIEC. 97 p.

IPCC. 2001. Bilan 2001 des changements climatiques : conséquences, adaptation et vulnérabilité. Rapport du groupe de travail II du GIEC. 101 p.

IPCC. 2003. Good practice guidance for Land-Use, Land-Use Change and Forestry. 599 p.

JOLIVET C., 2000. Le carbone organique des sols des Landes de Gascogne. Variabilité spatiale et effets des pratiques sylvicoles et agricoles. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne. 332 p.

KING D., JAMAGNE J., *et al.*, 1999. Inventaire cartographique et surveillance des sols en France. Etat d'avancement et exemples d'utilisation. Etude et Gestion des Sols, 6(4). pp 215-228.

PIROCHE JN., COLINOT A., 2002. Les indicateurs de gestion durable des forêts d'une petite région naturelle forestière. Projet Life « demonstration of methods to monitor sustainable forestry. 82 p.

LOUSTAU D., BERT D., TRICHET P., 1997. La productivité forestière du massif landais et sa gestion durable. Actes du IVème Colloque Arbora « De la Gestion au Développement Durable », 21/11/1997.

LOUSTAU D., **PLUVIAUD F.**, **BOSC A.**, **PORTE A.**, **BERBIGIER P.**, **DEQUE M.**, **PERARNAUD V.**, 2001. Sub-regional climate change impacts on the water balance, carbon balance and primary productivity of maritime pine in south-west France. *EFI Proceedings N°41*. pp 45-57.

LOWE H., **SEUFERT G.**, **RAES F.**, 2000. Comparaison of methods used within the Member States for estimating CO₂ emissions and sink according to UNFCCC and EU Monitoring Mechanism : forest and other wooded land. *Biotechnol, Agron. Soc. Environ..* Vol. 4, 4. pp 315-319.

LUGO AE. & BROWN S., 1993. Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon. *Plant and Soils*. 149. pp. 27-41.

MALFAIT JJ., **PAJOT G.**, **POINT P.**, 2003. Le puits de carbone landais. Actes du VIIème Colloque Arbora « Existe-t-il un modèle socio-économique landais ? », 16-17 novembre 2003.

MAAPAR. 2001. Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises. Edition 2000. 129 p.

MARLAND G., **SCHLAMADINGER B.**, 1998. Forests for carbon sequestration or fossil fuel substitution ? A sensitivity analysis. *Biomass and energy*. Vol. 13 n°6. pp 389-397.

MINISTERIAL CONFERENCE FOR THE PROTECTION OF FORESTS IN EUROPE. 2003. Déclarations et résolutions et indicateurs pour une gestion forestière durable. Vienne. 41 p.

NORVERTO C., 2004. La fijacion de CO₂ en plantaciones forestales y en productos de Madera en Argentina. Communication au XII congrès forestier mondial, Québec. 13 p.

PEFC AQUITAINE. 2001. Etat de lieux portant sur la gestion durable des forêts d'Aquitaine. Forêt d'Adour-Pyrénées. 112 p.
Forêt de Dordogne-Garonne. 101 p. + annexes
Massif des Landes de Gascogne. 127 p. + annexes

PIGNARD G., **DUPOUEYS JL.**, **ARROUAYS D.**, **LOUSTAU D.**, 2000. Carbon stocks estimates for french forests. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 4 (4). pp 285-289.

PIGNARD G., 2000. Evolution récente des forêts françaises : surface, volume sur pied, productivité. *Revue Forestière Française LII*. Numéro spécial 2000. pp 27-36.

PIGNARD G., **DUPOUEYS JL.**, 2002. Les flux de carbone dans les forêts françaises et européennes : apports des inventaires forestiers. *C. R. Acad. Agric. Fr.* pp. 7-17.

PLUVIAUD F., 2000. Impact climatique d'un scénario de doublement de CO₂ sur le bilan hydrique, la production primaire et la croissance du Pin maritime dans les Landes de Gascogne. Rapport de fin d'étude d'élève Ingénieur des Travaux. Toulouse. 63 p.

PORTE A., 1999. Modélisation des effets du bilan hydrique sur la production primaire et la croissance d'un couvert de pin maritime (*Pinus pinaster* Ait) en lande humide. Thèse de Doctorat, Paris XI. 160 p.

PORTE A., **TRICHET P.**, **BERT D.**, **LOUSTAU D.**, 2002. Allometric relationships for branch and tree woody biomass of maritime pine (*Pinus pinaster*). *Forest Ecology and Management*. 5431. pp 11-13.

SAMALENS JC., 2001. Estimation d'indicateurs de gestion durable des forêts : étude de faisabilité à l'échelle d'une petite région forestière. Rapport de fin d'études ENITA de Bordeaux. 55 p + annexes.

TREMBLAY S., **OUMET R.**, **HOULE D.**, 2003. Prédiction du carbone organique dans les sols forestiers du Québec. Note de recherche forestière n°124. XII congrès forestier mondial Québec. 6 p.

TRICHET P., **JOLIVET C.**, **ARROUAYS D.**, **LOUSTEAU D.**, **BERT D.**, **RANGER J.**, 1999. Le maintien de la fertilité des sols forestiers landais dans le cadre de la sylviculture intensive de pin maritime. *Revue bibliographique et identification des pistes de recherches. Etude et Gestion des Sols* 6, 4. pp 197-214.

ANNEXES

ANNEXE 1

Indicateur 1.1 – Surface boisée (Processus d'Helsinki, Vienne 2003)

“Surface de forêts et autres terres boisées par type de forêts et disponibilité pour la production de bois”

Approche retenue dans le cadre du projet FORSEE

Le groupe interrégional d'experts du critère 1 constitué à l'occasion du projet FORSEE a retenu de renseigner l'indicateur du processus d'Helsinki relatif à la surface boisée à l'aide des définitions arrêtées par la FAO pour l'évaluation des ressources forestières mondiales en 2005 (GFRA 2005). Il s'agit de permettre des comparaisons fiables des résultats entre les 9 régions des 4 pays associés au projet.

Enquêtes internationales sur les indicateurs de gestion durable des forêts

A partir de 1995, la France s'est engagée dans le cadre du processus d'Helsinki à publier tous les 5 ans « les indicateurs de gestion durable des forêts françaises ». La conférence de Vienne (2003) a précisé la forme et le contenu des indicateurs.

Par ailleurs, la France doit renseigner les 15 indicateurs retenus par la FAO pour son évaluation des ressources forestières mondiales en 2005 (GFRA).

Afin d'optimiser la collecte et le traitement des données, l'Administration forestière française a confié à l'IFN la préparation des réponses à ces 2 enquêtes dont certains indicateurs sont redondants.

Correspondances utilisées entre définitions FAO et processus d'Helsinki

Bien que la FAO ait initié un travail d'harmonisation avec les indicateurs de gestion durable du processus d'Helsinki, il apparaît que le renseignement pour la France de plus de la moitié des indicateurs du GFRA demande un certain nombre de reclassements dont les règles n'ont pas été arrêtées à ce jour par l'IFN.

C'est le cas de l'indicateur sur la surface des forêts pour lesquels les définitions de la FAO sont plus larges que celles de l'IFN.

Pour la réponse dans le cadre du processus d'Helsinki, l'IFN s'appuie sur les résultats de l'enquête Teruti (SCEES) et sur ses propres données.

Les règles des reclassements pour renseigner l'indicateur sur la surface boisée dans le cadre du GFRA 2005 seront arrêtées début 2005.

Par conséquent, les résultats que nous présentons ici sont issus d'un reclassement probable (tableau 15) sur la base des seules données de l'IFN. Les résultats seront complétés courant 2005 avec la publication des correspondances officielles. Il s'agira de compléter les résultats avec les données issues de l'enquête TerUti du SCEES.

Catégories	Définitions FAO/GFRA 2005	Correspondances IFN
Forêt	Terres occupant une superficie de plus de 0,5 ha avec des arbres atteignant une hauteur supérieure à 5 mètres et un couvert arboré de plus de 10%, ou avec des arbres capables d'atteindre ces seuils <i>in situ</i> . La définition exclut les terres à vocation agricole ou urbaine dominante.	Forêts de production (boqueteaux et bois > 0,5 ha) & Autres forêts
Autres terres boisées	Terres qui ne sont pas classées comme « forêt », couvrant une superficie de plus de 0,5 ha, avec soit des arbres d'une hauteur de plus de 5 mètres et un couvert forestier de 5-10%, soit des arbres capables d'atteindre ces seuils <i>in situ</i> , soit un couvert mélangé d'arbustes, d'arbrisseaux et d'arbres supérieurs à 10%. Sont exclues les terres où prédominent les usages agricoles ou urbains.	Landes
Autres terres	Terres n'entrant pas dans la catégorie des « forêt » ou « autres terres boisées ».	Forêts de production (0,05 < bosquets < 0,5 ha) & Terres agricoles & Terrains improductifs
Forêt de production	Forêt / autres terres boisées affectées à la production et à l'extraction de biens forestiers, y compris les produits ligneux et non-ligneux.	Forêts de production (boqueteaux et bois > 0,5 ha)
Autres terres dotées de couvert arboré	Terres classées comme « autres terres », occupant une superficie de plus de 0,5 ha, avec un couvert arboré supérieur à 10% formé d'arbres capables d'atteindre 5 mètres à maturité.	Non renseigné par l'IFN « il s'agit des vergers. Ils sont renseignés par TerUti »
Eaux intérieures	Les eaux intérieures comprennent les grands fleuves, lacs et réservoirs.	Eaux

Tableau 15 : correspondances utilisées dans l'étude entre les définitions de l'IFN et celles de la FAO

L'IFN établit la distinction entre « formations boisées de production » (ou forêts disponibles pour la production de bois au sens du processus d'Helsinki) et « autres forêts » sur la base de critères d'accessibilités aux massifs déterminés par photos-interprétation.

Pour l'étude en Aquitaine et par massifs PEFC nous avons regroupé les catégories « autres terres », « autres terres dotées de couvert arboré » et « eaux intérieures » dans une catégorie globale intitulée « autres ».

La ventilation des surfaces par type de forêts (feuillues / conifères / mixtes) sera renseignée avec la publication par l'IFN des correspondances nationales.

INDICATEUR 1.1 (processus d'Helsinki, Vienne 2003)

“Surface de forêts et autres terres boisées par type de forêt et disponibilité pour la production de bois”

DOMAINE D'ETUDE	COUVERTURE-USAGE DU SOL Définitions FAO* 2005	Surface (1000 ha) aux derniers inventaires disponibles**	Evolution de la surface (Derniers / Avant derniers inventaires disponibles)	Impact emploi définition FAO / définition IFN
ADOUR PYRENEES	FORET	271	10%	-2,1%
	FORET DE PRODUCTION	251	8%	-2,3%
	AUTRES TERRES BOISEES	116	-16%	
	AUTRES	639	0%	
	TOTAL MASSIF	1026	---	
DORDOGNE GARONNE	FORET	522	7%	-1,8%
	FORET DE PRODUCTION	505	8%	-1,9%
	AUTRES TERRES BOISEES	34	-36%	
	AUTRES	1269	-1%	
	TOTAL MASSIF	1825	---	
LANDES DE GASCOGNE	FORET	987	2%	-0,1%
	FORET DE PRODUCTION	965	1%	-0,1%
	AUTRES TERRES BOISEES	19	-33%	
	AUTRES	323	-2%	
	TOTAL MASSIF	1329	---	
REGION AQUITAINE	FORET	1781	4%	-0,9%
	FORET DE PRODUCTION	1721	4%	-0,9%
	AUTRES TERRES BOISEES	169	-23%	
	AUTRES	2231	-1%	
	TOTAL REGION	4181	---	

* Global Forest Resource Assesment 2005

**Inventaires IFN utilisés

	Dordogne	Gironde	Lot-et-Garonne	Landes	Pyrénées Atlantiques	Aquitaine (année moyenne disponible)
Avant derniers inventaires	1982	1987	1989	1988	1985	1986
Derniers inventaires	1992	1998	2000	1999	1995	1997

Représente la part
des bosquets dans
la surface boisée

ANNEXE 2

Indicateur 1.2 – Volume sur pied (Processus d'Helsinki, Vienne 2003)

« Volume sur pied des forêts et autres terres boisées, classé par type de forêts et par disponibilité pour la production de bois »

Zone atelier de Pontenx-les-Forges (40)

L'IFN produit des résultats départementaux qui peuvent être discrétisés au niveau des régions forestières départementales. Or la zone atelier de Pontenx est « à cheval » sur 2 régions forestières du département des Landes : « Dunes Littorales » et « Plateau Landais 4 ».

Pour le calcul de résultats d'inventaire dans des domaines géographiques quelconques, une méthode de couplage entre les données cartographiques et dendroécologiques est développée par l'IFN.

Rappel de la méthode d'inventaire général des formations boisées

Jusqu'en octobre 2004 l'inventaire des formations boisées consistait en un échantillonnage stratifié de la ressource.

L'objectif de la stratification est de constituer des strates aussi homogènes que possible au regard de variables d'intérêt. Dans le cadre de l'inventaire général, les variables principalement retenues sont les surfaces, volumes sur pied et accroissements éventuellement ventilés par grands groupes d'essences (distinction entre essences feuillues et résineuses par exemple). Pour constituer ces strates l'IFN dispose des données issues de la photo-interprétation.

Les Domaines d'Etudes Cartographiés (DEC) sont constitués par le croisement des régions forestières, des classes de propriété et des types de formation végétale. Les éléments de plus de 2,25 ha en surface et 75 m en largeur sont cartographiés. Beaucoup de ces DEC sont trop petits pour constituer une unité statistique suffisante. Des regroupements de DEC différents pour le seul type de formation végétale sont alors opérés afin de produire des Domaines d'Etude Statistiques (DES).

La stratification est effectuée à l'intérieur des DES. Les strates sont définies à partir de la cartographie et des informations de photo-interprétation ponctuelle (usage et/éventuellement volume à l'hectare, taille massif, etc.), avec l'idée de minimiser la variance au sein de chaque strate finale, et surtout la variance des estimateurs de volume. Les taux de sondage sont déterminés par la satisfaction d'un objectif de précision sur la principale variable à estimer.

Enfin la dernière opération consiste à mesurer ou observer sur le terrain les données d'inventaire directement utilisées dans le calcul des résultats.

Par conséquent, il est possible à partir d'une carte de la zone atelier de Pontenx d'identifier les DEC interceptés entièrement et partiellement et leur surface comprise dans la zone d'étude. Les valeurs dendrométriques attachées aux DES sont affectées au prorata de la surface qu'occupe chaque DEC dans la zone d'étude.

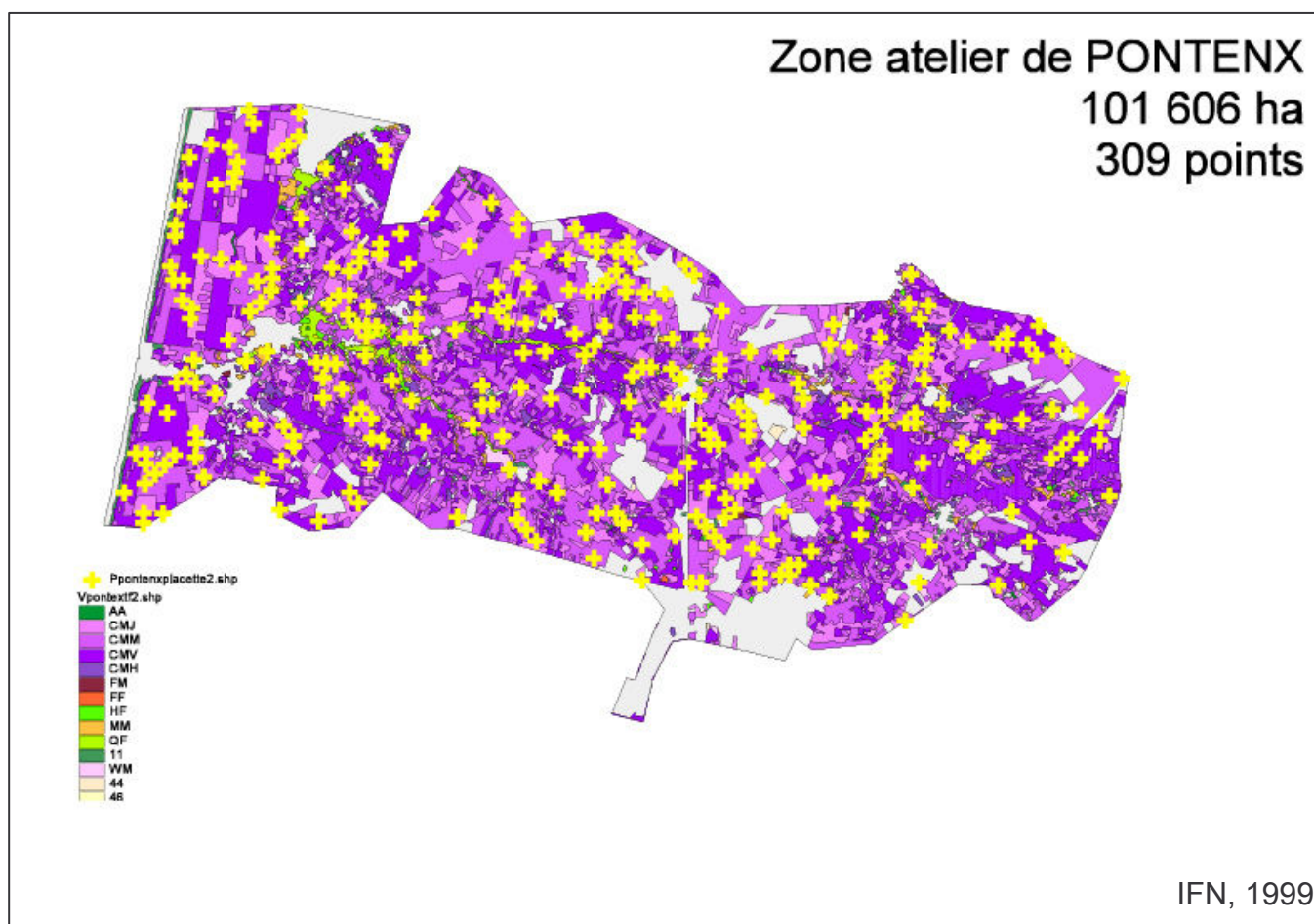
Résultats à l'échelle de la zone de Pontenx

Les résultats produits par la méthode de couplage « carto-dendro » sont statistiquement fiables lorsque la surface minimale est d'au moins 5000 ha et que le taux de boisement de la région considérée est relativement important. C'est le cas ici, la zone de Pontenx couvre plus de 101.000 ha.

Les résultats sont disponibles à partir du 4^{ème} inventaire des Landes. Auparavant la jointure entre DES et DEC n'avait pas été faite.

L'estimation statistique du volume de bois fort concerne les seules tiges recensables par l'IFN dans les forêts de production. Les résultats concernent :

- L'essence pin maritime ventilée par classes d'âge dans les futaies régulières,
- Les essences forestières conifères et feuillues présentes sur la zone.

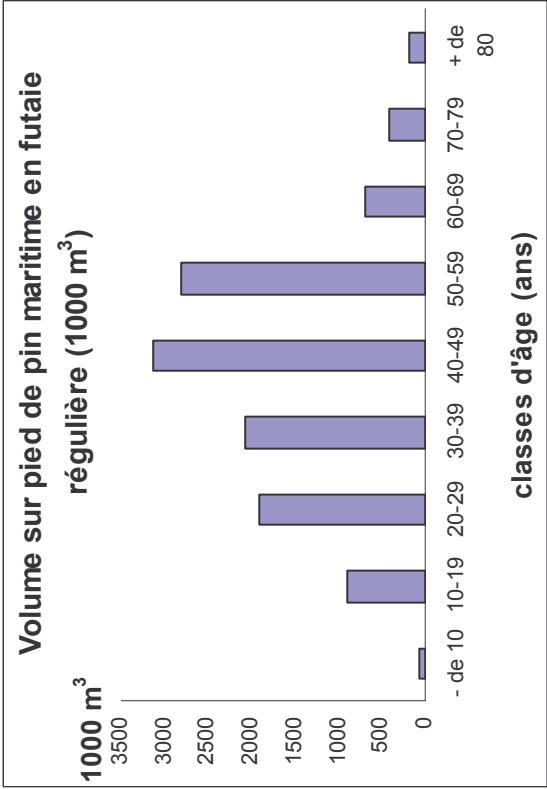


INDICATEUR 1.2 - Zone atelier de Pontenx-les-Forges

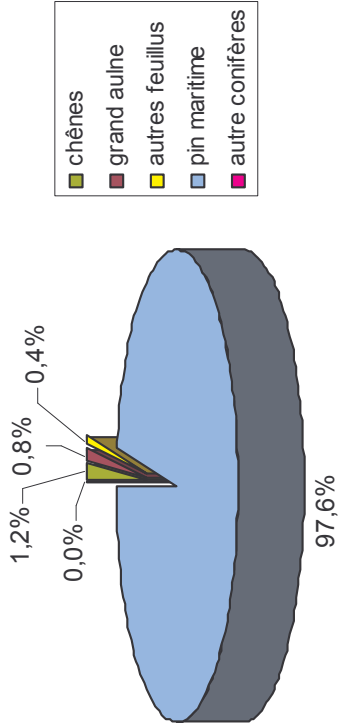
(Données extraites des résultats du 4^{ème} inventaire des Landes –1999)

Pin maritime en
futaie régulière

CLASSE D'ÂGE	VOLUME (1000 m³)
- de 10	59
10-19	901
20-29	1916
30-39	2076
40-49	3122
50-59	2813
60-69	685
70-79	420
+ de 80	179
TOTAL	12171



Volume sur pied dans la zone de Pontenx (Landes, 1999)



ESSENCE	Volume total sur pied (m³)
CHENE ROUVRE OU PEDONCULE	118 648
CHENE ROUGE D'AMERIQUE	43
CHENE TAUZIN	33 847
CHENE-LIEGE	3 456
CHATAIGNIER	8 417
BOULEAU	20 372
GRAND AULNE	100 877
ROBINIER FAUX ACACIA	3 466
FRENE	66
AUTRE FRUITIER	1 831
SAULE	13 010
AUTRE FEUILLU EXOTIQUE	188
NOisetier	10
ARBOUSIER	104
PIN MARITIME	12 433 031
PIN PIGNON	6 292

TOTAL

12 743 659

ANNEXE 3

APPROCHES RETENUES EN AQUITAINE

CRITERE 1 (processus d'Helsinki Vienne 2003)

“Conservation et amélioration appropriée des ressources forestières et de leur contribution aux cycles mondiaux du carbone”

Ind.	Description	Retenu	Ventilation	Echelle d'étude	Année d'étude	Cartographie
1.1	Surface forestière	OUI	- Forêts/forêt de production FAO - Autres terres boisées FAO	Aquitaine	1986 / 1997	NON
				Landes de Gascogne	1988 / 1999	NON
				Dordogne Garonne	1986 / 1997	NON
				Adour Pyrénées	1987 / 1997	NON
1.2	Volume sur pied	OUI	- Essences - Classes d'âge (PM)	Zone atelier de Pontenx	1999	NON
1.3	Structure par classe d'âge et/ou de diamètre	NON	---	---	---	---
1.4	Stock de carbone	OUI	Biomasse ligneuse	Aquitaine / RegD(*)	1990	OUI
				Landes de Gascogne	1988 / 1999 / 2000	OUI
				Dordogne Garonne	1979 / 1989 / 2000	OUI
				Adour Pyrénées	1982 / 1992	OUI
			Sols	Zone atelier de Pontenx	1999	NON
				Aquitaine / Landes de Gascogne / RegD	---	OUI
				Landes de Gascogne	1990 / 1998 / 2001 / 2010	NON
			Emissions de CO ₂	Landes de Gascogne	1999 / 2001	NON

(*) RegD : régions forestières départementales de l'IFN

ANNEXE 4

RESOLUTION DE VIENNE n°5 (Processus d'Helsinki) Changements climatiques et gestion forestière durable en Europe

[...]

Les Etats signataires et la Communauté Européenne s'engagent à :

[...]

6. contribuer à la mise en œuvre de l'UNFCCC et du Protocole de Kyoto par le maintien du stock de carbone et par l'augmentation de la séquestration du carbone des forêts en Europe, grâce :

a) à l'encouragement de pratiques de gestion forestière durable, prenant en compte les possibilités de mise en œuvre des activités forestières dans le cadre du Protocole de Kyoto,

b) aux plans ou programmes forestiers nationaux, qui fournissent les directives appropriées pour que le boisement et le reboisement prennent dûment en compte les valeurs environnementales, en particulier la diversité biologique, économique et sociale, dans le but d'atténuer les effets négatifs potentiels des boisements à grande échelle,

c) au soutien à la recherche et à l'analyse de la portée et des méthodes potentielles de séquestration du carbone en forêt et de stockage du carbone dans les produits forestiers, des avantages et des coûts qui s'y rapportent, ainsi que des voies et moyens pour les partager.

[...]

9. contribuer davantage au travail en cours de l'UNFCCC sur l'élaboration de méthodes pour estimer, mesurer, surveiller et faire rapport sur les modifications de stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers et les produits forestiers, sur base des systèmes existants et en coopération avec les organisations concernées,

10. partager les expériences acquises au niveau paneuropéen sur les stratégies nationales et régionales relatives à la forêt, visant l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, et contribuer au développement des politiques qui s'y rapportent ; contribuer activement aux prochaines délibérations de l'UNFCCC et de son Protocole de Kyoto, de manière à s'assurer que les décisions sur les mesures relatives à la forêt ainsi que sur leur mise en œuvre soient prises conformément à la gestion forestière durable.

ANNEXE 5

Extrait du rapport final du projet CARBOFOR – pp.56-57

Biomasse aérienne totale pour le pin maritime dans les Landes de Gascogne

Dans cet exemple, nous présenterons deux modèles de biomasse établis pour le Pin maritime dans les Landes de Gascogne. Les deux modèles considérés permettent de modéliser la biomasse sèche aérienne totale au dessus du sol. Les deux formes choisies sont les suivantes :

$$(1) W_i = a_s \cdot D_i^{bs} + \varepsilon_i$$

$$(2) W_i = a_s \cdot D_i^{bs} \cdot A_i^{cs} + \varepsilon_i$$

W_i est la biomasse aérienne totale (kg); D_i première variable indépendante principale est le diamètre de l'arbre à 1,30 m (cm) ; A_i seconde variable indépendante est l'âge compté depuis la germination ; a_s , b_s , et c_s sont les paramètres à estimer du modèle, l'indice s faisant référence à l'échantillon complet considéré ; et sont les variances résiduelles non expliquées par les modèles. Ces deux modèles sont de forme allométrique ($y=ax^b$). L'introduction de l'âge permet de prendre en compte une évolution avec le temps.

Le jeu de données disponibles provient de 4 parcelles de Pin maritime situées en Gironde (France) et est réparti en 5 classes d'âges (1 site échantillonné deux fois). Pour chaque peuplement, un jeu de relations allométriques par compartiment a été mis au point (Pegoraro, 1997 ; Porté, 1999 ; Porté *et al.*, 2000 ; Porté *et al.*, 2002). La biomasse totale de chaque arbre est obtenue en sommant les estimations de chacun des compartiments.

L'ajustement à l'aide du modèle 1 est présenté dans la Figure 1. Les résultats des deux ajustements non linéaires sont décrits dans le Tableau 4.

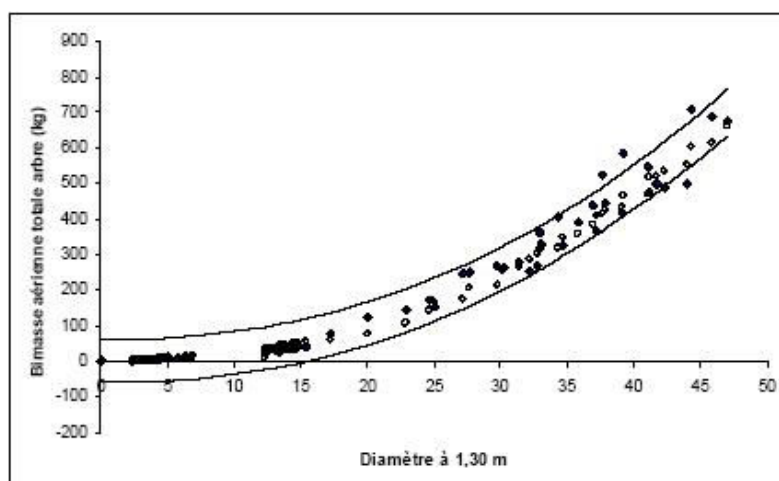


Figure 1. Ajustement de la biomasse aérienne totale à l'aide du modèle 1. Les lignes sont les intervalles de confiance à 95%.

Modèle	Paramètre a	Paramètre b	Paramètre c	SCE résidus
1	0.137362 (0.036483)	2.217272 (0.072476)	-	77801.2
2	0.093818 (0.020302)	1.992049 (0.062046)	0.329843 (0.038891)	41108.1

Tableau 4. Paramètres des modèles allométriques pour estimer la biomasse aérienne totale par arbre. N.B. Estimation des paramètres et (valeurs des écart-types) ; SCE = Somme des carrées des écarts

La poursuite de ce travail doit conduire à revoir les pondérations de ces modèles de biomasse aérienne totale et à calculer les intervalles de confiance des estimations. Ces modèles pourront être utilisés en routine dans des outils pour estimer les stocks de carbone au cours de la vie des peuplements. Une étude est engagée pour vérifier la validité de ces modèles dans des conditions de fertilité variées.

ANNEXE 6

Coefficients spécifiques au pin maritime en futaie régulière sur le massif landais (Chantal, 2001)

Facteur d'expansion de biomasse totale	
Si peuplement de pin Maritime ≤ 27 ans	$F_{exp} = \frac{b + a \times \text{âge}}{\text{Age}}$ Avec a = 1,138989 b = 12,54
Si peuplement de pin Maritime > 28 ans	$F_{exp} = 1,6$ (valeur française pour les conifères, CITEPA)
Infradensité du bois	
Si peuplement de pin maritime ≤ 70 ans	$D_{bois} = 0,356 \times e^{(0.0051 \times \text{âge})}$
Si peuplement de pin maritime > 70 ans	$D_{bois} = 0,51$
Teneur en C	
0.5 tC / tMS	

ANNEXE 7

Extrait du rapport final du projet CARBOFOR – pp.58-59

Tarifs de cubage pour le volume total aérien des principales essences françaises (Tarifs LERFOB)

L'élaboration de tarifs de cubage pour le volume aérien total de l'arbre permet d'éviter la multiplication des erreurs induites par les facteurs d'expansion branches. L'objet de l'étude étant l'estimation de la ressource nationale, la représentativité de l'échantillon est primordiale. Les arbres ainsi choisis forment une base de données de 4543 individus. Les 7 essences pour lesquelles nous avons élaboré des tarifs sont le Chêne sessile, le Hêtre, le Douglas, l'Epicéa, le Sapin pectiné, les Pins (maritime, laricio, sylvestre et noir) ainsi que le Mélèze.

L'hétéroscédasticité du volume nous a conduit à travailler sur le facteur de forme. Le volume s'écrit donc

$$(1) \quad v_{tot} = \frac{1}{4\pi} \cdot c_{130}^2 \cdot h_{tot} \cdot f$$

où f est le facteur de forme, sans unité, c_{130} et h_{tot} la circonférence et la hauteur en mètres, et v_{tot} le volume en m3. C'est la variable f que nous modélisons. La forme générale est :

$$(2) \quad f(c_{130}, h_{tot}) = (\alpha + \beta \times c_{130} + \gamma \times \frac{\sqrt{c_{130}}}{h_{tot}}) \cdot (1 + \frac{\delta}{c_{130}^2}) + \varepsilon$$

où α , β , γ et δ sont des paramètres à ajuster.

Le tableau récapitulatif des résultats pour chacune des essences concernées est présenté ci dessous. Nous observons des similitudes dans l'évolution des facteurs de forme en fonction de c_{130} entre certaines essences. Les résineux « sombres » (Epicéas, Douglas et Sapin) ont une diminution forte du facteur de forme avec la circonférence, ce qui signifie que plus ils sont gros, plus l'arbre est de forme conique. A l'inverse, les facteurs de forme du Chêne et du Hêtre augmentent tous les deux avec la robustesse de l'arbre, ce qui signifie qu'à circonférence constante, plus l'arbre est trapu, plus le volume est de forme cylindrique. Les Pins ont un comportement proche de celui du Hêtre.

Tableau 6 : Estimation des paramètres pour les différentes essences

	Essence	Chêne sessile	Douglas	Epicéa commun	Hêtre	Pins	Mélèzes (Eur. & Jap.)	Sapin pectiné
Estimation	α	0,471	0,534	0,631	0,395	0,311	0,550	0,550
	β	-0,034	-0,053	-0,095	0,027	0,040	-0,135	-0,075
	γ	3,77	--	--	4,21	3,40	3,22	2,77
	δ	--	0,0057	--	0,0045	0,0191	--	--
Ecart-type	α	0,014	0,01	0,007	0,010	0,015	0,05	0,015
	β	0,0013	0,0097	0,0072	0,0049	0,0143	0,016	0,0039
	γ	0,312	--	--	0,247	0,185	1,1	0,344
	δ	--	0,0014	--	0,0004	0,0019	--	--
Prob. Crit.	α	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0048	< 0,0001	< 0,0001
	β	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
	γ	< 0,0001	0,0004	--	< 0,0001	< 0,0001	0,005	< 0,0001
	δ	--	--	--	< 0,0001	< 0,0001	--	--

ANNEXE 8

Extrait du rapport final du projet CARBOFOR – p.64

	Feuillus	Résineux
Facteur d'expansion branches Volume aérien ligneux / volume tige	1.611	1.335
Facteur d'expansion racine Volume ligneux total / volume aérien ligneux	1.28	1.30
Facteur d'expansion global Volume ligneux total/ volume tige	2.063	1.735
Infradensité du bois	0.546	0.438
Taux de carbone	0.475	0.475
Ratio global (tC/m³IFN) Masse carbone / volume tige	0.535	0.361

Coefficients multiplicateurs génériques issus du projet de recherche CARBOFOR

ANNEXE 9

Stocks et flux de C dans la biomasse des arbres

Massif	Essences	Avant dernier inventaire disponible		Dernier inventaire disponible		Flux annuel moyen / période	PUITS / SOURCE
		Stock C	Année moy.	Stock C	Année moy.		
Landes de Gascogne	Pin maritime en futaie régulière	45,08 MtC	1988	48,93 MtC	1999	+ 0,35 MtC/an	PUITS de C
		56,4 tC/ha		60,2 tC/ha		+ 0,35 tC/ha/an	
	Toutes	50,91 MtC	1988	55,28 MtC	1999	+ 0,4 MtC/an	PUITS de C
		53,2 t C/ha		57,3 tC/ha		+ 0,37 tC/ha/an	
Dordogne Garonne	Toutes	26,16 MtC	1979	32,31 MtC	1989	+ 0,62 MtC/an	PUITS de C
		54,8 tC/ha		64 tC/ha		+ 0,92 tC/ha/an	
Adour Pyrénées	Toutes	17,08 MtC	1982	20,86 MtC	1992	+ 0,38 MtC/an	PUITS de C
		71,3 tC/ha		83,3 tC/ha		+ 1,2 tC/ha/an	
Région Aquitaine	Toutes			104,08 MtC	1990		
				60,8 tC/ha			

Impacts de la tempête sur les stocks et flux de C dans la biomasse des arbres

Massif	Essences	Inventaire actualisé après tempête		Impact tempête sur stock de C	Flux de C période 1988 - 2000	PUITS / SOURCE
		Stock C	Année moy.			
Landes de Gascogne	Pin maritime en futaie régulière	41,36 MtC	2000	-7,57 MtC	-0,34 MtC/an	SOURCE de C
		50,9 tC/ha		-9,3 tC/ha	-0,5 tC/ha/an	
	Toutes	45,79 MtC	2000	-9,49 MtC	-0,47 MtC/an	SOURCE de C
		47,4 tC/ha		-9,9 tC/ha	-0,53 tC/ha/an	
Massif	Actualisation de la ressource 1999	Impact tempête 1999	Flux de C			
			MtC/an	Période	PUITS / SOURCE	
Dordogne Garonne	37,46 MtC	- 3,06 MtC	+0,56	1979-1999	PUITS de C	
			+0,39	1979-2000	PUITS de C	
			+0,19	1989-2000	PUITS de C	