AgroParisTech
ENGREF
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES
FORMATION DES INGÉNIEURS FORESTIERS

Forêt Privée Française

Forêt Privée Française CNPF IDF

Carbone et gestion forestière en forêt privée française

Comparaison d'itinéraires sylvicoles de gestion forestière améliorée et perspectives quant à leur valorisation via des projets carbone

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Simon Martel
18e promotion (2006-2010)

Août 2010

Crédits des illustrations :

Rejets d'usine : Enviro-2B

Cépée de châtaignier : Simon Martel

Peuplement de Douglas : Simon Martel

Alignement de bois : Simon Martel

AgroParisTech ENGREF
Formation des ingénieurs forestiers

Forestiers privés de France
Institut pour le
développement forestier

Carbone et gestion forestière en forêt privée française

Comparaison du bilan de plusieurs itinéraires techniques et perspectives de valorisation par des projets standardisés

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Simon Martel
18e promotion (2006-2010)

Août 2010

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE DE LA FIF

Formation des ingénieurs forestiers de l'ENGREF Agro Paris Tech	TRAVAUX D'ÉLÈVES
TITRE : *Carbone et gestion forestière en forêt privée française* *Comparaison d'itinéraires sylvicoles de gestion forestière améliorée et perspectives quant à leur valorisation via des projets carbone*	Mots clés : *carbone, séquestration, forêt privée, sylviculture, atténuation*
AUTEUR(S) : *Simon Martel*	Promotion : *18e (2006-2010)*
Caractéristiques : *1 volume ; 108 pages ; 35 figures ; 18 tableaux ; 8 annexes*	

CADRE DU TRAVAIL		
ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT :	*Institut pour le développement forestier*	*Forestiers privés de France*
Nom du responsable : Fonction :	*Olivier Picard* *Responsable recherche et développement*	*Éric Toppan* *Adjoint au directeur responsable des affaires économiques*
Nom du correspondant ENGREF (pour un stage long) : *Franck Lecocq*		

Tronc commun ■ Option ☐ D. d'approfondissement ☐	Stage en entreprise ☐ Stage à l'étranger ☐ Stage fin d'études ■ Date de remise :	Autre ☐
Contrat avec Gref Services Nancy ☐ OUI ■ NON		

SUITE À DONNER (réservé au service des études)

☐ Consultable et diffusable
☐ Confidentiel de façon permanente
☐ Confidentiel jusqu'au / / , puis diffusable

Résumé

Grâce à leur capacité de séquestration du carbone, les forêts constituent un outil de lutte contre l'effet de serre. Des modifications de la gestion forestière peuvent avoir un effet bénéfique sur le bilan carbone, effet que les forestiers privés français souhaiteraient quantifier. À cela s'ajoute le fait que la séquestration additionnelle pourrait théoriquement être valorisée sur les marchés carbone volontaires. Cette étude apporte des éléments sur ces différents points par (i) l'élaboration d'une méthodologie simplifiée de quantification du bilan carbone à l'échelle du peuplement (ii) une estimation, par l'intermédiaire d'études de cas, de l'impact de changements d'itinéraires techniques sur la séquestration en forêt, le stockage dans les produits bois et la substitution (iii) le bilan économique d'un projet carbone fictif conforme aux standards internationaux.

Summary

The French forestry sector significantly contributes to climate change mitigation. Improved forest management practices can lead to additional carbon sequestration which can offer financial incentive through voluntary carbon markets. This study presents (i) a simplified methodology to estimate the carbon balance of a forest stand (ii) an assessment of the additional carbon storage (forest and wood products) and substitution effect for two case-studies (iii) an economic evaluation of a fictive offset carbon project complying with international carbon standards.

Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord à mes deux maîtres de stage, Olivier Picard et Éric Toppan, qui m'ont accompagné tout au long de ce travail. En se rendant disponibles malgré leurs emplois du temps chargés et en travaillant ensemble en parfaite entente, ils ont su réunir les meilleures conditions pour la réussite de mon travail. Le tout dans la bonne humeur !

Je tiens à remercier toute l'équipe de l'IDF d'Auzeville et celle de la Fédération Forestiers privés de France à Paris. J'ai été chaleureusement accueilli sur mes deux lieux de stage et j'ai pu compter sur l'aide de chacun pour de nombreux aspects pratiques. Un merci particulier à Mireille pour l'aide apportée à la mise en page finale de ce rapport.

Je suis également reconnaissant envers tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à améliorer ce travail. J'ai eu la chance d'être en contact avec de nombreux acteurs du monde de la forêt et du carbone et je tiens à leur exprimer ma gratitude pour les apports qu'ils ont pu avoir concernant cette étude :

- Franck Lecocq, mon tuteur Agroparistech-Engref, pour son suivi et ses conseils ;
- Christophe Drénou, Jean Lemaire et Philippe Riou-Nivert de l'IDF pour les données fournies et les critiques constructives apportées tout au long du stage ;
- Éric Sevrin, Gilles Pichard et Yann Vandebeulque pour leurs conseils sur la sylviculture du châtaignier ;
- les correspondants des sites de démonstration : MM. Gilbert Tisserand, Yann Mozziconacci, Bruno Vanstaevel, Alain Davase et Alexandre Guerrier qui m'ont accompagnés sur le terrain et fourni les données nécessaires à l'étude ;
- Mariana Deheza et Valentin Bellassen de la CDC Climat recherche, Marianne Rubio de l'ONF et Florianne François de la Société Forestière pour le partage de leurs connaissances concernant les marchés du carbone forestier ;
- Mathieu Fortin de l'INRA pour sa relecture critique de la partie méthodologique.

Enfin, merci à Marlène pour son soutien au jour le jour et ses relectures minutieuses de future institutrice !

Bilan carbone du stage

Déplacements	Distance (km)	Émissions par unité (g eqC/km)		Émissions totales (teqC)
Voiture	5159	37,9	(1)	0,196
TGV	3500	6,1	(2)	0,021
RER-métro	288	6,5	(2)	0,002
Consommables	**Poids (kg)**	**Émissions par unité (g eqC/kg)**		**Émissions totales (teqC)**
Papier	12	550	(1)	0,007

(1) Source : ADEME, 2010

(2) Source : ecocomparateur sncf

En effectuant un stage sur le thème du carbone, il m'est apparu intéressant de calculer le bilan carbone du stage lui-même. Les émissions de gaz à effet de serre engendrées par les déplacements et la consommation de papier au cours du stage ont donc été estimées. Même si des efforts de limitation de l'empreinte carbone ont été fournis (trajets quotidiens en vélo et transports en commun, utilisation préférentielle du train pour les longs trajets), les inévitables déplacements en voiture effectués pendant la phase de terrain ont été une importante source d'émission de carbone. Les ordres de grandeur de ce bilan (0,22 teqC) restent faibles par rapport à ceux de la séquestration de carbone en forêt, mais ils résultent d'émissions effectuées sur une échelle de temps beaucoup plus courte.

Table des matières

REMERCIEMENTS **1**

TABLE DES MATIÈRES **2**

TABLE DES ANNEXES **3**

TABLE DES FIGURES **3**

TABLE DES TABLEAUX **4**

INDEX ALPHABÉTIQUE DES SIGLES **5**

INTRODUCTION **6**

1. FORÊT FRANÇAISE ET CARBONE : ÉTAT DES LIEUX **7**

1.1. LA CONTRIBUTION POSITIVE DU SECTEUR FORESTIER 7
1.1.1. Les forêts au cœur du cycle du carbone *7*
1.1.2. Une contribution positive au bilan national *8*
1.1.3. Le tryptique vertueux des forêts gérées durablement *9*
1.2. LES MARCHÉS DU CARBONE FORESTIER 10
1.2.1. Les forêts françaises au sein du protocole de Kyoto *10*
1.2.2. Le marché de la compensation volontaire *11*
1.2.3. Les projets carbone forestiers : critères de qualité et typologie de projet *12*
1.3. ÉTAT DES LIEUX DE LA VALORISATION DU CARBONE FORESTIER EN FRANCE 13
1.3.1. Revue des initiatives de valorisation du carbone forestier français *13*
1.3.2. Une étude basée sur le réseau de sites pilotes France forêt *16*

2. QUANTIFICATION DE L'IMPACT CARBONE DE LA SYLVICULTURE D'UN PEUPLEMENT FORESTIER : RECHERCHE D'UNE MÉTHODE D'ÉVALUATION **18**

2.1. HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES 18
2.1.1. Les stocks de carbone du sol sont considérés comme constants *18*
2.1.2. La biomasse du sous-étage est négligée *18*
2.1.3. Échelle spatiale *19*
2.1.4. Échelle temporelle *19*
2.1.5. Quantification prudente et conservatrice *19*
2.2. MÉTHODE DE QUANTIFICATION DES STOCKS DE CARBONE FORESTIER 19
2.2.1. Biomasse aérienne *19*
2.2.2. Biomasse racinaire *22*
2.2.3. Quantités de carbone *23*
2.2.4. Quantités de dioxyde de carbone *23*
2.3. PROLONGATION DU STOCKAGE DANS LES PRODUITS BOIS 23
2.3.1. Répartition du bois exploité en différentes catégories de produits *23*
2.3.2. Durée de vie des produits *24*
2.3.3. Répartition temporelle des stocks des produits *26*
2.4. EFFET DE SUBSTITUTION 26
2.4.1. Substitution énergétique *27*
2.4.2. Substitution matériau *28*
2.5. QUANTIFICATION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE LIÉES AUX ACTIVITÉS FORESTIÈRES 29
2.5.1. À partir de données relevées lors des opérations sylvicoles *29*
2.5.2. À partir de facteurs d'émission génériques par type d'opération *30*

3. ÉTUDE DE CAS SUR DEUX SITES DU DISPOSITIF FRANCE-FORÊT **31**

3.1. SITE DE GAUDEIX : FUTAIE RÉGULIÈRE DE DOUGLAS 31
3.1.1. Description du site *31*
3.1.2. Gestion historique *31*

3.1.3. Estimation des stocks actuels *32*
3.1.4. Modélisation de différents scénarios sylvicoles *32*
3.2. SITE DU VAL D'OISE : TAILLIS DE CHÂTAIGNIER 36
3.2.1. Description du site *36*
3.2.2. Estimation des stocks actuels *36*
3.2.3. Hypothèses de quantification : modélisation de la croissance *37*
3.2.4. Description de la gestion historique et de l'itinéraire de référence *37*
3.2.5. Premier itinéraire alternatif : amélioration du taillis pour la production de bois d'œuvre. *37*
3.2.6. Second itinéraire alternatif : amélioration du taillis pour la production de bois d'œuvre et irrégularisation *38*
3.2.7. Bilan carbone de chacun des scénarios *38*
3.2.8. Comparaison des différents scénarios *40*

4. VERS UNE VALORISATION ÉCONOMIQUE DE LA SÉQUESTRATION DU CARBONE PAR LA FORÊT FRANÇAISE ? 41

4.1. LA STANDARDISATION DES PROJETS VOLONTAIRES 41
4.2. LA MÉTHODOLOGIE, ÉLÉMENT CENTRAL POUR BÂTIR DES PROJETS STANDARDISÉS 42
4.2.1. Place de la méthodologie dans le référentiel VCS *42*
4.2.2. Vers la construction d'une méthodologie pour des projets de gestion forestière améliorée en France *43*
4.3. BILAN ÉCONOMIQUE APPLIQUÉ À UN CAS D'ÉTUDE 44
4.3.1. Description du projet carbone potentiel *44*
4.3.2. Calcul des revenus *45*
4.3.3. Coût de mise en place du projet carbone *48*
4.3.4. Hypothèses du calcul économique *49*
4.3.5. Calculs économiques *49*
4.3.6. Conclusion du bilan économique de cette étude de cas fictive *51*

5. DISCUSSION ET PERSPECTIVES 52

5.1. DES MÉTHODES DE QUANTIFICATION À OPTIMISER POUR RÉDUIRE LES ERREURS 52
5.2. PROJETS NON STANDARDISÉS : UNE PREMIÈRE ÉTAPE 53
5.3. VERS UNE NÉCESSAIRE RÉFLEXION SUR LE REGROUPEMENT DES PROPRIÉTAIRES EN FORÊT PRIVÉE 53
5.4. CARBONE ET MULTIFONCTIONNALITÉ FORESTIÈRE 54
5.5. UN CADRE RÉGLEMENTAIRE NOUVEAU POUR L'APRÈS 2012 ? 55

CONCLUSION 56

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 57

LISTE DES CONTACTS 62

ANNEXES 65

Table des annexes

Annexe 1. Méthodologie d'inventaire de terrain pour l'estimation des stocks de carbone *65*
Annexe 2. Répartition des sites pilote France forêt selon les modes de gestion (forêt privée) *73*
Annexe 3. Présentation didactique de l'action sur les sites *77*
Annexe 4. Fiche du site pilote n° 17 : Futaie irrégulière de Douglas dans le Morvan *83*
Annexe 5. Fiche du site pilote n° 6 : Plantation de chênes en Dordogne *91*
Annexe 6. Comparaison de deux méthodes de quantification de la prolongation du stockage dans les produits bois *95*
Annexe 7. Plaquette de présentation du club carbone forêt-bois *99*
Annexe 8. Présentation orale réalisée à l'AG de Forestiers privés de France le 10 juin 2010 ..... *105*

Table des figures

Figure 1. – Répartition des stocks de carbone mondial (hors océan). ... 7
Figure 2. – Le cycle du carbone à l'échelle planétaire. ... 7
Figure 3. – Contribution des différents secteurs aux émissions nationales. ... 8
Figure 4. – Stock de carbone dans les écosystèmes forestiers français. ... 8
Figure 5. – Schématisation des 3 effets d'atténuation de la forêt ... 9
Figure 6. – Soldes « Kyoto » de la forêt française en 2008. ... 10
Figure 7. – Surfaces forestières par type de marché ... 11
Figure 8. – Les avantages des projets forestiers pour les acheteurs de crédit. ... 12
Figure 9. – Plantation Forestavenir ... 14
Figure 10. – Vue du lieu de plantation. ... 14
Figure 11. – Coupe rase de taillis à coté d'une parcelle de taillis amélioré dans le Bas Dauphiné. ... 15
Figure 12. – Sites de démonstration « carbone » France-forêt ... 16
Figure 13. – Châtaigniers issus de taillis non éclaircis. ... 20
Figure 14. – Comparaison des méthodes de cubage taillis de châtaignier. ... 21
Figure 15. – Cycle de vie du produit « parquet/lambris » ... 25
Figure 16. – Utilisation des panneaux en France. ... 25
Figure 17. – Séquestration du carbone dans un billon de châtaignier ... 26
Figure 18. – Chantier d'exploitation en forêt du Nouvion. ... 30
Figure 19. – Localisation du site de démonstration ... 31
Figure 19. – Plan d'échantillonnage du site n°7 ... 32
Figure 20. – Estimation des stocks de carbone « biomasse » pour le site n°7 ... 32
Figure 21. – Bilan carbone du scénario en 45 ans ... 34
Figure 22. – Bilan carbone du scénario en 55 ans ... 35
Figure 23. – Plan de situation du site pilote 11. ... 36
Figure 24. – Photographie du site pilote 11 ... 36
Figure 26. – Simulation du premier itinéraire alternatif ... 39
Figure 27. – Simulation du second itinéraire alternatif ... 40
Figure 28. – Processus de certification de projets par le VCS. ... 42
Figure 29. – Stock de carbone des parcelles du scénario de référence du projet. ... 45
Figure 31. – Crédits carbone (VCU) délivrés lors du projet fictif ... 46
Figure 32. – Comparaison des VAN ... 49
Figure 33. – Comparaison des TIR pour différents TIR prix de vente de crédits ... 50
Figure 34. – Prix des crédits carbone nécessaires pour obtenir différents TIR. ... 51

Table des tableaux

Tableau 1. – Coefficients des équations allométriques. ... 20
Tableau 2. – Infradensité des principales essences françaises. ... 22
Tableau 3. – Durées de vie apparentes par sous-filière. ... 24
Tableau 4. – Durées de vie apparentes par produit ... 26
Tableau 5. – Facteurs d'émission de différents combustibles ... 27
Tableau 6. – Taux de substitution ... 28
Tableau 7. – Facteurs d'émission. ... 29
Tableau 8. – Émissions liées aux différentes opérations sylvicoles. ... 30
Tableau 9. – Itinéraire technique du site n°7 ... 32
Tableau 10. – Itinéraire technique correspondant à des révolutions de 45 ans ... 33
Tableau 11. – Itinéraire technique correspondant à des révolutions de 55 ans ... 34
Tableau 12. – Itinéraire technique du scénario de référence ... 37
Tableau 13. – Itinéraire technique du premier scénario alternatif ... 39
Tableau 14. – Itinéraire technique du second scénario alternatif ... 39
Tableau 15. – Comparaison des principaux standards des marchés volontaires. ... 42
Tableau 16. – Age des peuplements de quelques parcelles ... 46
Tableau 17. – Hypothèses d'exploitation des bois ... 47

Index alphabétique des sigles

ACV	analyse du cycle de vie
ADEME	Agence du développement et de la maitrise de l'énergie
AFI	association futaie irrégulière
ASFFOR	association des sociétés et groupements fonciers et forestiers
ASL	association syndicale libre
CAPI	communauté d'agglomération porte de l'Isère
CAREV	contrat d'achat de réduction d'émissions vérifiées
CDC	Caisse des dépôts et consignations
CCBS	Climate, community and biodiversity standard
CCNUCC	convention cadre des nations unies sur le changement climatique (UNFCCC en anglais)
CCX	Chicago climate exchange
CFS	Carbon fix standard
CRPF	centre régional de la propriété forestière
DDP	document descriptif de projet (PDD en anglais)
ENGREF	École nationale du génie rural, des eaux et des forêts
EOD	entité opérationnelle désignée
EPANI	établissement public d'aménagement Nord-Isère
ERA	Extension of rotation age
FCBA	Institut technologique forêt, cellulose, bois construction et ameublement
GES	gaz à effet de serre (GHG en anglais)
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais)
IBP	indice de biodiversité potentiel
IDF	Institut pour le développement forestier
IFM	Improved forest management
IFN	Inventaire forestier national
IFR	Inventario forestale regionale
INRA	Institut national de la recherche agronomique
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
LtHP	Low to hight-productive forest
LtPF	Logged to protected forest
NIP	note d'idée de projet (PIN en anglais)
ONF	Office national des forêts
ONFI	Office national des forêts international
MOC	mise en œuvre conjointe
MDP	mécanisme de développement propre
REDD	réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts
SCEQE	système communautaire d'échange de quotas d'émission
SYSSO	syndicat des sylviculteurs du Sud-ouest
TIR	taux interne de rentabilité
UA	unités d'absorption
UIPP	Union des industries des panneaux de process
UQA	unités de quantité attribuée (AAU en anglais)
UTCF	utilisation des terres, leur changement et la forêt (LULUCF en anglais)
VAN	valeur actualisée nette
VCS	Voluntary carbon standard
VCU	Voluntary carbon unit

Introduction

Le changement climatique est un défi environnemental majeur du XXIe siècle, auquel doivent faire face citoyens et décideurs publics. Les scientifiques s'accordent à dire que l'augmentation d'origine anthropique des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère est à la base de ces changements (GIEC, 2007). La limitation des émissions de GES fait l'objet d'importantes négociations internationales, et des engagements contraignants de réduction des émissions ont par exemple été pris à Kyoto en 1997. Le dioxyde de carbone (CO_2) est le gaz qui contribue le plus aux émissions anthropiques de GES, à hauteur de 77 % (GIEC, 2007). Or, le rôle joué par les arbres dans le cycle du CO_2 est primordial : les forêts de la planète séquestrent chaque année de l'ordre de 1 GtC (GIEC, 2007). En France, les écosystèmes forestiers sont également un puits de carbone puisqu'ils absorbent annuellement l'équivalent de 13 % des émissions nationales (CITEPA, 2010). Les forêts françaises constituent ainsi un véritable outil de lutte contre l'effet de serre.

Alors que le bilan carbone forestier est connu au niveau national (Dupouey *et al.*, 2010 ; Loustau, 2004), peu d'études ont été menées à l'échelle du peuplement forestier. De même, si la séquestration de carbone d'un boisement a fait l'objet de travaux par le passé (Reverchon, 2006), l'impact des choix de gestion sylvicole sur des peuplements existants est mal connu. Des travaux de modélisation menés sur le chêne sessile (Robert, 2008 ; Vallet, 2005) ont mis en évidence des différences de bilan carbone significatives entre scénarios sylvicoles.

Dans un contexte où tout est mis en œuvre pour atténuer les effets des changements climatiques, propriétaires et gestionnaires privés souhaitent mieux connaitre l'influence de leurs décisions de gestion sur le bilan carbone. Ils peuvent agir à trois niveaux : sur la séquestration de carbone en forêt, sur la prolongation du stockage dans les produits bois qui sont formés et sur les émissions évitées par substitution du bois à d'autres matériaux. L'identification d'itinéraires techniques permettant d'optimiser le bilan carbone constituerait un élément supplémentaire d'aide à la décision. Par ailleurs, le rôle joué par la forêt dans la limitation de l'effet de serre était considéré jusqu'à peu comme un service non marchand. Il pourrait, dans certains cas, être valorisé économiquement (Deheza et Bellassen, 2010 ; Jullian *et al.*, 2009). Il existe dans ce sens une forte attente des forestiers, qui souhaiteraient diversifier leurs revenus. Si des projets carbone volontaires peuvent être mis en place en France, leur labellisation par des standards internationaux a un coût. Il convient de le comparer aux revenus tirés de la vente de crédits carbone.

Le présent travail, encadré par l'Institut pour le développement forestier (IDF) et la fédération nationale des syndicats de propriétaires privés, s'attache à donner des réponses à ces interrogations. Dans un premier temps, une méthode simplifiée permettant le calcul d'un bilan carbone à l'échelle du peuplement forestier a été élaborée. Mise au point à partir de méthodes existantes, elle est adaptée au contexte des forêts privées. Elle a été appliquée sur des sites pilotes de l'association France-forêt pour quantifier le gain en termes de carbone provoqué par des changements de sylviculture. Les simulations ont permis de chiffrer l'impact de (i) l'allongement des révolutions en futaie régulière de Douglas et de (ii) la conversion d'un taillis de châtaignier en futaie. Dans un second temps, les conditions d'accès aux marchés du carbone ont été étudiées. Le bilan économique d'un projet fictif d'allongement des révolutions apporte des éléments de discussion sur la mise en place de projets carbone volontaires en France.

Deux unités sont couramment utilisées pour traiter des quantités de carbone. Alors que les énergéticiens et les économistes raisonnent en tonnes de CO_2 (tCO_2), les biologistes parlent de tonnes de carbone (tC). Bien que la conversion de l'une à l'autre des unités soit aisée, il est préférable d'éviter les confusions. Les données de ce rapport sont donc données en tonnes de carbone (tC) pour les parties concernant la quantification (parties 1.1., 2 et 3) et en tonnes de CO_2 pour les parties concernant la valorisation économique du carbone (parties 1.2., 4 et 5).

1. Forêt française et carbone : état des lieux

1.1. La contribution positive du secteur forestier

1.1.1. Les forêts au cœur du cycle du carbone

Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), même si le CO_2 est le gaz qui a le plus petit pouvoir de réchauffement par molécule, il est celui qui a contribué le plus au réchauffement climatique depuis 1750. Le cycle du carbone est complexe et fait intervenir différents réservoirs. Le plus important est constitué par les océans qui stockent 39 200 milliards de tonnes de carbone (GtC), soit environ 93 % du carbone de la planète (GIEC, 2007). Les 7 % restants se répartissent entre la biomasse terrestre, les sols et l'atmosphère (voir figure 1). Avec 750 GtC, cette dernière représente moins de 2 % du carbone de la planète. **Les forêts constituent un stock très important puisqu'elles représentent plus de la moitié du carbone des terres émergées (1 120 GtC).**

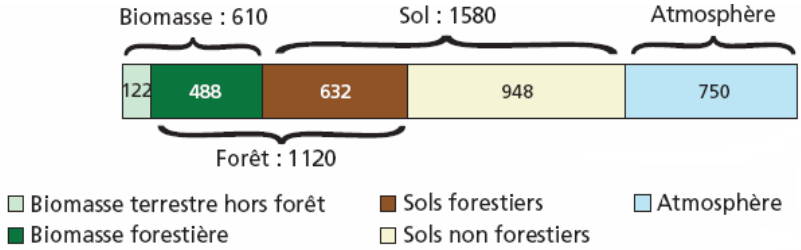


Figure 1. – Répartition des stocks de carbone mondial (hors océan) en GtC. Source : GIEC, 4é rapport du 1er groupe de travail, 2007

Les quantités séquestrées dans ces différents réservoirs ne sont pas figées : il existe de nombreux flux entre ces derniers (voir figure 2). Ainsi, les flux entre les écosystèmes forestiers et l'atmosphère sont de l'ordre de 120 GtC/an au niveau mondial. Les absorptions sont dues à la photosynthèse qui absorbe le CO_2 atmosphérique. Les rejets s'expliquent par les phénomènes de respiration (autotrophe et hétérotrophe) ainsi que par les perturbations (climatiques et sylvicoles). Ces flux sont loin d'être négligeables puisque la déforestation tropicale est responsable de 17,4 % des émissions de GES au niveau planétaire (FAO, 2009).

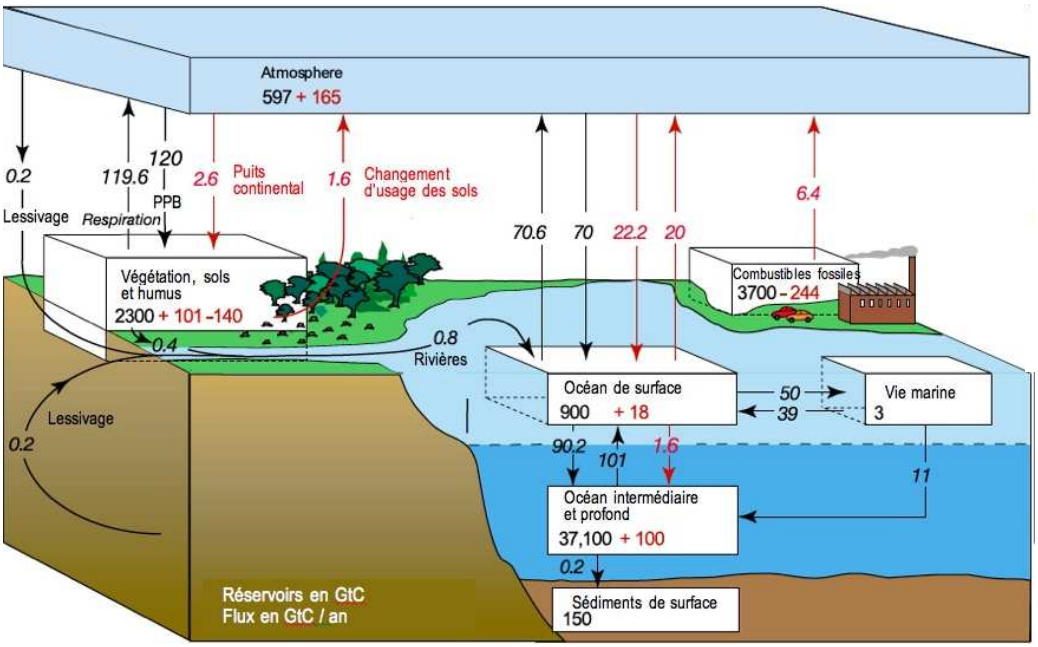


Figure 2. – Le cycle du carbone à l'échelle planétaire. Source : GIEC, 4é rapport du 1er groupe de travail, 2007.

Les écosystèmes forestiers jouent donc un rôle majeur dans le cycle du carbone et il est indispensable de les intégrer dans la réflexion sur la lutte contre l'effet de serre.

1.1.2. Une contribution positive au bilan national

Alors que les secteurs du transport routier et de l'industrie manufacturière sont les plus émetteurs de GES dans notre pays, le secteur UTCF (utilisation des terres, leur changement et la forêt) représente un puits de carbone. Le dernier inventaire national GES montre que la forêt française absorbe chaque année plus de 18 millions de tonnes de carbone (MtC), **soit l'équivalent de 13 % du total des émissions nationales** (CITEPA, 2010). Ce rôle positif joué par la forêt est dû à deux facteurs :

- l'augmentation de la surface forestière. La surface occupée par la forêt en France est en constante progression depuis plusieurs décennies. Cette progression a néanmoins connu un coup d'arrêt dernièrement comme le montrent les données Teruti-Lucas (ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, 2010) ;
- l'accroissement biologique des peuplements en place. Étant en grande partie issue de reboisements relativement récents, la forêt française est jeune. Son stock sur pied s'accroît donc naturellement.

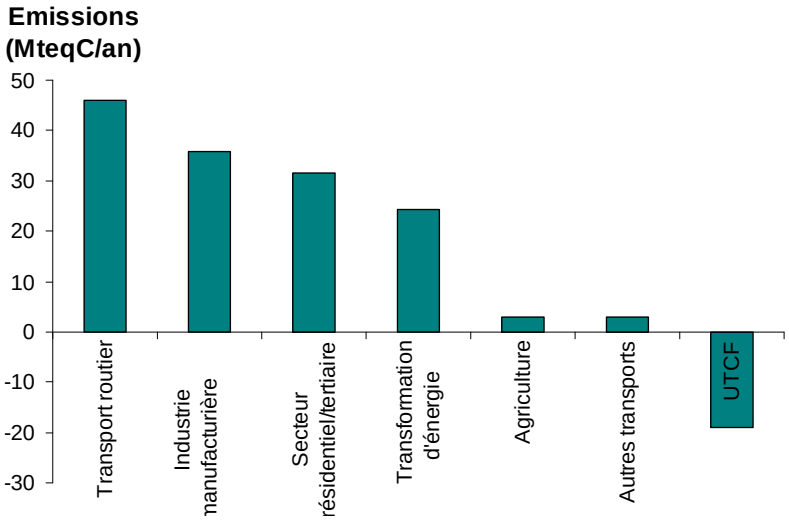


Figure 3. – Contribution des différents secteurs aux émissions nationales. Données : CITEPA, 2009.

Différentes études ont permis d'estimer les stocks de carbone en forêt à l'échelle de la France et leur répartition dans les différents compartiments (voir figure 4). **Le stock de carbone moyen est estimé à 71 tC/ha** pour la biomasse aérienne et souterraine, avec 76 tC/ha pour les peuplements feuillus et 62 tC/ha pour les peuplements résineux (Dupouey *et al.*, 2010). L'incertitude la plus importante concerne les stocks de carbone dans les sols forestiers (Lecocq *et al.*, 2008 ; Nys *et al.*, 2008). L'estimation la plus fiable donne toutefois pour les sols forestiers français un stock moyen de 79 tC/ha (Dupouey *et al.*, 2000) : **le stock de carbone du sol peut représenter la moitié du stock total de l'écosystème.**

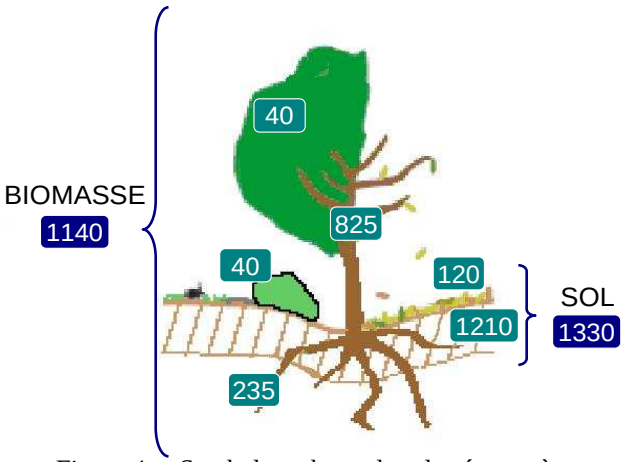


Figure 4. – Stock de carbone dans les écosystèmes forestiers français en millions de tonnes de carbone (MtC). Données biomasse : Dupouey *et al.*, 2010 ; données sol : Dupouey *et al.*, 2000.

1.1.3. Le tryptique vertueux des forêts gérées durablement

Les forêts françaises, par le mécanisme de la photosynthèse, contribuent à **séquestrer** du carbone. On peut considérer que ces forêts sont globalement exploitées et gérées de façon durable, et que leur stock est donc reconstitué progressivement après chaque prélèvement (par plantation ou régénération naturelle). Toutefois, la mobilisation des bois ne doit pas être considérée comme un déstockage, même ponctuel. En effet, l'utilisation du bois permet de **prolonger le stockage du carbone** dans les produits formés. Le stock formé par les produits bois en France a ainsi été chiffré à 47 MtC pour l'année 2005 (FCBA, 2008). L'augmentation de ce stock contribue par ailleurs à une absorption annuelle de GES compris entre 1,3 et 1,5 MtC (estimation par la méthode de variation des stocks pour l'année 2005 : FCBA, 2008 et Lecocq *et al.*, 2007). Enfin, l'utilisation du bois permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES) **en se substituant à des produits à fort contenu en énergie fossile**.

Ainsi, la gestion durable de la forêt française a **un triple effet sur l'atténuation de l'effet de serre** : la séquestration de carbone en forêt, le stockage dans les produits bois et la substitution de ces produits bois à d'autres matières premières au « coût carbone » élevé.

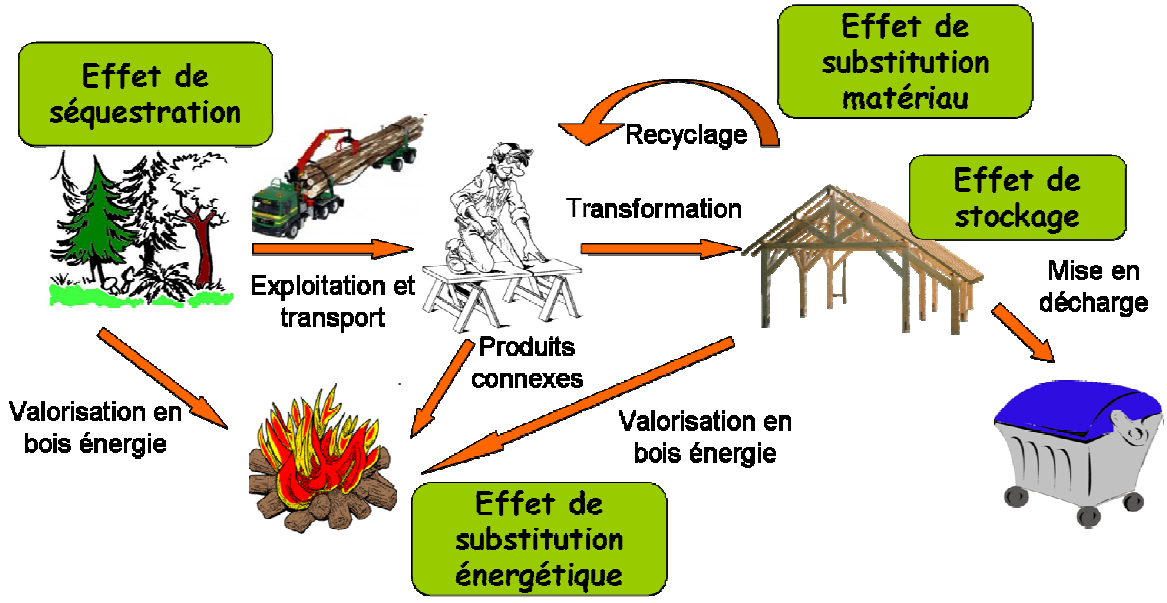


Figure 5. – Schématisation des effets de séquestration, stockage et substitution

Une récente étude réalisée en Suisse a démontré, grâce à des simulations, que le « bénéfice carbone » sur le long terme et à l'échelle nationale est plus grand dans le cas où la forêt est exploitée de façon durable que dans le cas où la forêt évoluerait sans intervention du forestier (Taverna *et al.*, 2007). Ce constat s'explique en grande partie par les effets de substitution dus à l'utilisation de bois énergie et de bois matériaux en remplacement d'autres matériaux. Même si l'étude porte uniquement sur la Suisse, il est possible d'extrapoler ses conclusions à la France : à long terme, la gestion durable avec récoltes régulières et valorisation énergétique des sous-produits et des produits en fin de vie est plus intéressante pour le climat que la simple conservation des stocks de carbone en forêt. C'est d'ailleurs l'une des conclusions du GIEC, reprise dans le 4e rapport (2007) : *« Sur le long terme, une stratégie de gestion durable des forêts visant à maintenir ou à augmenter le stock de carbone en forêt tout en approvisionnant la filière bois (grume, fibre et énergie) à un niveau de prélèvement durable, générera les bénéfices d'atténuation maximum ».*

Les forêts françaises constituent un **outil de lutte contre le changement climatique** : elles ont un impact important sur les quantités de GES, et en particulier du CO_2, dans l'atmosphère. Différents leviers d'action permettent d'augmenter l'effet positif de la forêt sur le climat (boisement, augmentation des stocks en forêt, de l'effet de substitution…). Cet effet additionnel, généralement

enclenché par l'action du forestier, pourrait être valorisé. À l'heure où des processus se mettent en place pour lutter contre l'effet de serre, il est légitime de se demander quelle est la place de la forêt française au sein de ces mécanismes.

1.2. Les marchés du carbone forestier

1.2.1. Les forêts françaises au sein du protocole de Kyoto

La France, qui comme 40 pays industrialisés a ratifié le protocole de Kyoto, est soumise à des engagements de réduction ou de stabilisation de ses émissions anthropiques de GES. Dans le cas où le pays ne parvient pas à les réduire, il existe plusieurs possibilités :

- l'achat d'unités de quantité attribuée (UQA) à d'autres pays qui ont réussi à réduire leurs émissions au-delà de leurs engagements ;
- l'investissement dans des projets réducteurs d'émission grâce aux mécanismes de flexibilité du protocole de Kyoto : mise en œuvre conjointe (MOC) ou mécanisme de développement propre (MDP) ;
- l'attribution sous certaines conditions d'un autre type de crédit carbone, les unités d'absorption (UA), issues du secteur forestier national. Les règles d'attribution de ces UA sont régies par les articles 3.3 et 3.4 du protocole de Kyoto.

1.2.1.1. L'article 3.3 : boisement, reboisement et déboisement

L'article 3.3 impose aux états la comptabilisation des émissions et séquestrations liées aux opérations de boisement et déboisement, lesquelles débouchent sur un changement d'usage des terres. La variation nette du stock de carbone de ces terres, qui ont changé d'usage depuis 1990, constitue le « solde 3.3 ». Si ce solde est négatif, la France est autorisée à combler le déficit à l'aide du surplus « inépuisable » produit par l'article 3.4 (dans la limite de 9 $MtCO_2$ par an). L'État français n'est donc pas incité à rétrocéder des UA à des porteurs de projets de boisement ou reboisement.

1.2.1.2. L'article 3.4 : forêt gérée

L'article 3.4 du protocole de Kyoto permet d'inclure de façon optionnelle la comptabilisation des émissions et de la séquestration liées à la gestion des forêts. Il s'agit en fait du changement de stock de carbone des terres demeurées d'usage forestier depuis 1990. Toutefois, ce « solde 3.4 » est plafonné, afin d'éviter les effets d'aubaine liés au vieillissement normal des forêts ou à leur croissance supplémentaire relative aux changements climatiques. Le plafond est fixé à 3,2 $MtCO_2$ pour la France, alors que ses forêts absorbent l'équivalent de 67 $MtCO_2$ (voir paragraphe 1.1.2.). **L'État n'est donc pas non plus incité à favoriser des projets d'amélioration de la séquestration forestière car il est assuré d'être au dessus du plafond de 3,2 $MtCO_2$ fixé pour son solde 3.4.**

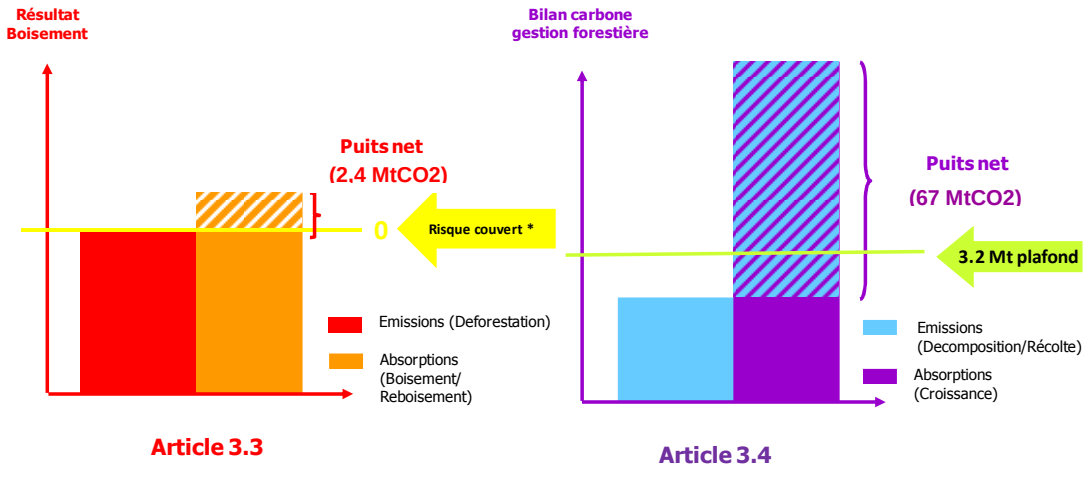


Figure 6. Soldes « Kyoto » de la forêt française en 2008. Source : CDC Climat Recherche

1.2.1.3. Séquestration dans les produits bois

La séquestration dans les produits bois n'est pas prise en compte dans les mécanismes du protocole de Kyoto. Elle représente toutefois un enjeu de taille et sera vraisemblablement incluse lors de négociations futures (voir paragraphe 5.5).

1.2.1.4. Substitution bois matériau et bois énergie

Les émissions évitées par effet de substitution lorsque du bois est utilisé à la place d'autres matériaux ou énergies fossiles sont déjà prises en compte dans le bilan national. En effet, une diminution des émissions des secteurs de l'énergie ou de la production de matériaux est reportée dans l'inventaire national français et libère des UQA. **Il n'est donc pas possible qu'un porteur de projet reçoive des crédits carbone pour la substitution du bois produit**, sous peine de « double compte ». Cette incitation à utiliser du bois se traduit en France par un avantage compétitif donné aux produits bois :

- indirectement par la soumission des plus grosses installations industrielles au système communautaire d'échange de quotas d'émission (SCEQE) ;
- plus directement par la mise en place de projets domestiques réducteurs d'émission pour les petites installations de production de chaleur.

1.2.2. Le marché de la compensation volontaire

Parallèlement aux marchés réglementaires issus du protocole de Kyoto, un marché du carbone volontaire s'est mis en place : il permet à des entreprises, à des acteurs publics ou à des particuliers non soumis aux contraintes législatives de s'engager de leur propre gré à compenser leurs émissions de GES. La compensation permet ainsi à ces entités de « neutraliser » leurs impacts sur le climat. Les entreprises et institutions peuvent être intéressées par la compensation volontaire pour des raisons éthiques, pour améliorer leur image environnementale ou pour anticiper de futures régulations. Cette démarche de compensation n'a de sens que si elle s'accompagne d'une forte politique de réduction des émissions au sein des entreprises. Il ne s'agit en effet que d'un levier secondaire visant à compenser les émissions qu'il n'est pas possible de réduire en interne. Dans le cas contraire et lorsque la communication de l'entreprise est disproportionnée par rapport à l'action menée, de telles pratiques sont critiquables et peuvent être qualifiées d'écoblanchiment ou *greenwashing*.

Au niveau mondial, le marché volontaire est encore de faible taille, mais il connaît une croissance rapide. En 2008, 123,4 MteqCO_2 se sont échangées sur le marché volontaire, soit près du double du volume d'échange de 2007 (Hamilton *et al.*, 2009). Certes, cela ne représente que 9 % de la quantité de crédit carbone échangée dans le cadre de Kyoto pour les projets MDP et MOC. De plus, cette croissance du marché a été stoppée en 2009 (94 MteqCO_2 échangées) en raison de la crise économique et des incertitudes quant au devenir des marchés réglementaires américain et australien (Hamilton *et al.*, 2010a). Toutefois, les prévisions de croissance de ce marché son optimistes : les volumes échangés pourraient atteindre 800 MteqCO_2 à l'horizon 2012, soit plus de huit fois le volume d'échange actuel (Hamilton *et al.*, 2010a). Sa croissance dépend en partie de l'évolution des négociations internationales concernant le régime post-Kyoto.

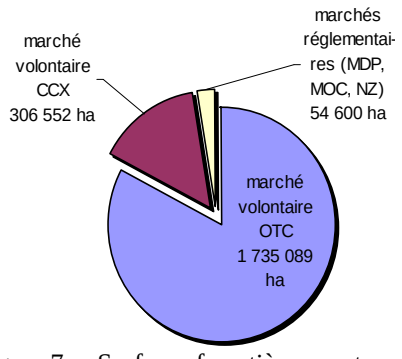


Figure 7. – Surfaces forestières par type de marché. Données : Hamilton et *al.*, (2010b) sur un échantillon de 226 projets carbone

Au sein des marchés volontaires, les projets forestiers occupent une part non négligeable. Ainsi, parmi les crédits carbone échangés sur le marché volontaire, 7 % sont issus de projets forestiers, contre seulement 0,1 % sur le marché réglementaire (Chenost *et al.*, 2010). Ceci s'explique par le fait que les projets forestiers possibles au sein du protocole de Kyoto se limitent aux projets de boisement et reboisement alors que de nombreux types de projets sont envisageables sur les marchés volontaires (voir paragraphe 1.2.3.).

Bien qu'il n'existe pas encore en France de projet forestier délivrant des crédits vendus sur le marché volontaire (les projets existants relèvent plus du mécénat), **ce dernier représente une voie de développement importante.** C'est en effet le seul marché sur lequel des projets forestiers français de gestion sylvicole améliorée pourraient être valorisés (avant d'éventuels changements dans le régime post-Kyoto). La proximité des projets est un critère important pour les entreprises et collectivités qui souhaitent compenser leurs émissions. Ce critère de proximité se retrouve en 4e position des avantages des projets forestiers cités par les acheteurs de crédits carbone (Ecosecurities, 2009). Le caractère local de la compensation rend l'opération plus intéressante en termes de communication. Enfin, les risques peuvent être considérés comme moins élevés pour des projets menés en France que pour des projets menés dans des pays politiquement instables.

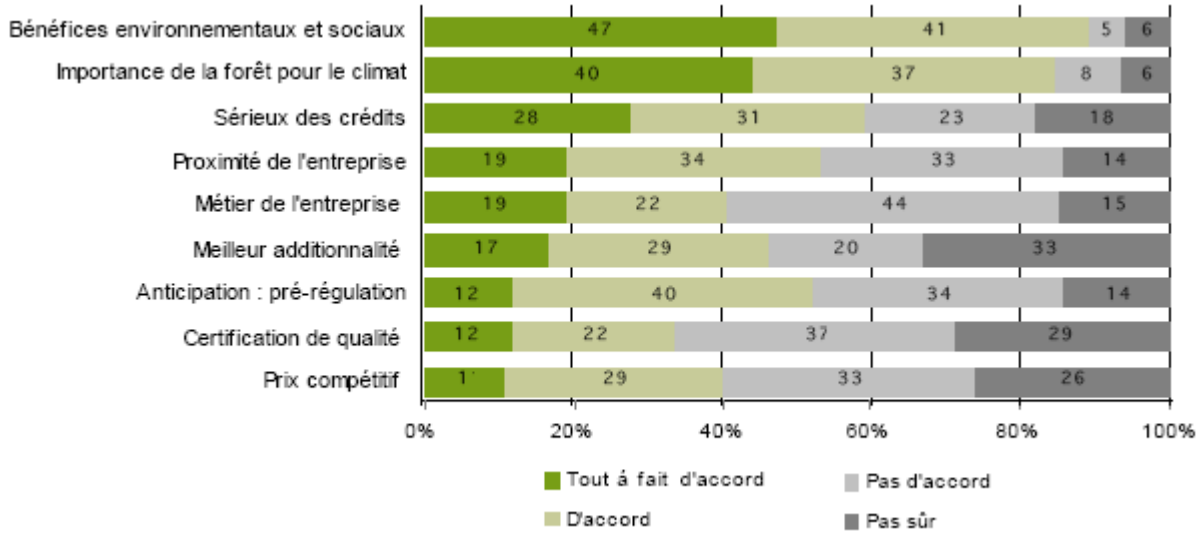


Figure 8. – Les avantages des projets forestiers pour les acheteurs de crédit.
Source : Ecosecurities, 2009. Traduit par Chenost et al., 2010.

Il existe une demande de la part de certains acteurs économiques français pour compenser leurs émissions via des projets carbone forestiers en France. **Un club carbone forêt-bois a été créé** à l'initiative de la filiale climat recherche de la caisse des dépôts et consignations (CDC), de la forêt privée française (FPF), de l'Office national des forêts (ONF) et de sa filiale ONF international, de l'Institut technologique forêt, cellulose, bois-construction et ameublement (FCBA), de la Société forestière de la caisse des dépôts, de l'Association des sociétés et groupements fonciers et forestiers (ASFFOR) et du syndicat des sylviculteurs du Sud-Ouest (SYSSO). Le club s'est donné comme objectif de mettre en place les conditions pratiques nécessaires au développement de projets carbone standardisés au sein de la filière foret-bois française. L'objectif est de répondre à la demande d'entreprises et de collectivité qui voudraient compenser leurs émissions via la forêt, tout en faisant bénéficier la filière de nouvelles sources de revenus. Concrètement, la mutualisation des moyens des membres fondateurs et le partage des retours d'expérience devraient permettre l'émergence de projets carbone en France d'ici quelques années. Au-delà des objectifs affichés, ce club constitue une voix forte et consensuelle montrant la volonté des acteurs de la filière pour que le rôle positif de la forêt et du matériau bois soient pris en compte d'une manière ou d'une autre.

1.2.3. Les projets carbone forestiers : critères de qualité et typologie de projet

Pour pouvoir accéder au marché en vendant des crédits carbone, il est nécessaire de mettre en place un **projet carbone.** Ce projet doit respecter certains critères inhérents à l'économie du carbone, valables aussi bien pour les projets du MDP que pour les projets volontaires.

– **L'additionnalité :** seules sont acceptées les réductions d'émission et les séquestrations qui ont lieu en plus de celles qui auraient eu lieu en l'absence de projet. Les crédits carbone générés par le projet sont donc calculés par différence entre les « bénéfices carbone » du projet et les « bénéfices carbone » d'un itinéraire de référence (*baseline* en anglais).

- **La permanence :** pour les projets forestiers, les risques de non permanence sont élevés (le carbone séquestré peut être réémis à tout instant par un incendie, une tempête…). Pour pallier ces risques, des crédits temporaires valables sur une période déterminée peuvent être émis (c'est le cas des projets forestiers du MDP) ou une partie des crédits peut être mis en réserve (système mis au point par des standards de projets volontaires).
- **Le double compte** : la traçabilité des unités de carbone qui s'échangent sur les marchés est indispensable. Des crédits carbone issus d'un même projet ne peuvent donc pas être vendus plusieurs fois, que ce soit sur un même marché ou sur des marchés différents.

Les projets forestiers sont de plusieurs natures et peuvent être classés en différentes catégories suivant le changement d'usage des sols qu'ils occasionnent ou non.

- Les projets de **boisement et reboisement** (afforestation and reforestation : AR) : ils consistent en la conversion de terres non forestières (friches, terres agricoles) en forêt.
- Les projets de **réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts** (REDD). Ces projets sont relatifs à des terres forestières transformées en « terres non forestières ». Ils concernent surtout les forêts tropicales.
- Les projets de **gestion forestière améliorée** (*Improved forestry management* : IFM). Cette catégorie comporte les projets qui permettent d'augmenter la séquestration par un changement des pratiques sylvicoles dans des forêts qui ont vocation à le rester. Au sein de cette catégorie, il est possible de différencier plusieurs sous-ensembles de projets suivant la technique sylvicole utilisée. Citons l'allongement des rotations (*Extending rotation age* : ERA), la conversion de forêts peu productives en forêts productives (*Low to hight-productive forest* : LtHP) ou encore la conversion de forêts exploitées en forêts protégées (*Logged forests to protected forests* : LtPF).

1.3. État des lieux de la valorisation du carbone forestier en France

1.3.1. Revue des initiatives de valorisation du carbone forestier français

En France, il n'existe pas à proprement parler en France de projet carbone délivrant des crédits vendus sur un marché. Néanmoins, différentes initiatives de compensation de taille modeste ont vues le jour au cours des dernières années, sous la forme du mécénat environnemental. Ces projets permettent aux forestiers de financer des actions sylvicoles (plantation, éclaircie d'amélioration) qui n'auraient pas pu avoir lieu sans apport financier extérieur. Le « mécène » peut quant à lui communiquer sur la compensation de tout ou partie de ses émissions.

1.3.1.1. Des projets de reboisement de taille modeste

En termes de communication, planter des arbres est une action qui a un impact fort auprès du grand public et qui intéresse donc les mécènes potentiels. De plus, la séquestration de carbone additionnelle est évidente et palpable par tous. C'est ainsi que les premières initiatives qui ont vu le jour sont des actions de boisement et de reboisement.

(i) Boisement autour de points de captage à Querrien (Finistère)

C'est par l'intermédiaire de la société anglaise Carbon Neutral Company, qui propose des prestations de compensation carbone, que l'entreprise de location de véhicule Avis a financé une plantation sur 16 ha. Ce boisement a été effectué en 2006 sur des terrains communaux de la ville de Querrien, autour de points de captage de sources. La fonction de protection de la ressource en eau est donc dans ce cas combinée au rôle de séquestration de carbone. La commune, qui reste propriétaire des terrains a accordé une concession de 99 ans à la société et celle-ci a versé en contrepartie la somme de 19 000 euros (FNCOFOR, 2005). Ce partenariat a constitué une première en France pour la compensation carbone forestière.

(ii) Le projet Forestavenir en région Provence Alpes Côte d'Azur

Figure 9. – Plantation Forestavenir. Photo : TF1.

Cette initiative a vu le jour en 2006 sous l'impulsion de l'association Forestour, réseau de propriétaires forestiers de Provence-Alpes-Côte-d'Azur engagés dans la promotion du rôle social des forêts. Forestavenir propose aux automobilistes circulant dans cette région de compenser les émissions dues à leurs déplacements par la plantation d'arbres. Ces boisements sont effectués localement sur des friches agricoles dans le but de produire du bois d'œuvre de qualité. Les citoyens parrainant l'opération de plantation ont une autorisation d'accès au terrain. Cette initiative s'inscrit dans un programme international plus global, la « campagne pour un milliard d'arbres » du programme des Nations Unies pour l'environnement. Afin de quantifier les quantités de carbone séquestrées par les plantations, un outil de calcul a été mis en place grâce à l'appui technique du centre régional de la propriété forestière (CRPF) (Reverchon, 2006). Même si une telle démarche est difficilement applicable à plus grande échelle de par la multitude des acteurs qu'elle implique (les automobilistes parrainent chaque arbre individuellement), cette première initiative a permis de souligner l'existence d'une demande de compensation carbone de la part des particuliers. Par ailleurs, la mise en place d'un outil de quantification crédibilise la démarche.

(iii) Les projets de boisements en partenariat avec l'ONF

Plusieurs projets de boisement à vocation de compensation ont vu le jour en France grâce à des partenariats engagés entre l'Office national des forêts (ONF) et des entreprises ou institutions. Les principaux projets sont décrits ci-dessous :

- *Projet de « puits de carbone » de la ville de Narbonne*

Ce projet mis en œuvre en 2008 a consisté au boisement de 32 ha sur une ancienne garrigue. L'opération de plantation a été effectuée sur un terrain communal et financée par la ville de Narbonne. D'après les estimations de l'ONF, ce projet devrait permettre la séquestration de 723 teqC (source : ONF et ville de Narbonne, 2008).

- *Projet de « puits de carbone » Nord Isère*

Un boisement de 10 hectares constitue le projet de puits de carbone « Nord Isère », qui a vu le jour grâce à une convention signée entre plusieurs acteurs locaux :

Figure 10. – Vue du lieu de plantation du projet Nord Isère. Source : EPANI.

- l'établissement public d'aménagement Nord-Isère (EPANI, ex EPIDA), qui a mis à disposition les terrains et assure la maîtrise d'ouvrage ;
- différentes entreprises et un lycée qui financent les études préalables, les travaux initiaux de plantation et l'entretien pendant les cinq premières années ;
- la CAPI (Communauté d'agglomération porte de l'Isère), qui inscrit cet espace forestier dans son patrimoine et garantira son maintien pendant au moins 50 ans.

La mise en œuvre de ce projet, dont l'originalité réside dans la multitude d'acteurs participants, a débuté en 2008 avec la plantation des 10 000 arbres (source : ONF et EPANI, 2008).

- *Projet de « puits de carbone » de la principauté de Monaco*

La fondation Prince Albert II de Monaco s'est engagée dans la lutte contre l'effet de serre et participe à des actions de compensation. Ainsi, par l'intermédiaire d'un partenariat avec l'ONF et la fondation, la principauté de Monaco a financé le boisement d'un puits de carbone de quatre hectares dans les forêts communales voisines de La-Turbie et de Cap-d'Ail (source : ONF et principauté de Monaco, 2007). Suite à cette première action, d'autres plantations ont été initiées par la fondation princière et financées par des entreprises privées en avril 2008. Ainsi, lors des journées monégasques du reboisement, un nouveau puits de carbone de 10 ha a été constitué. On notera que ce projet a été remis en cause par des associations naturalistes car la plantation aurait porté atteinte à des espèces protégées (Nice matin du 28 mars 2008).

Dans chacun de ces projets, l'ONF assure l'expertise technique en intervenant comme « opérateur puits de carbone ». L'image de marque dégagée par cet établissement bien connu du grand public est également utilisée par les entreprises et collectivités pour communiquer sur les projets qu'elles financent.

1.3.1.2. Un projet innovant de gestion sylvicole améliorée en Rhône-Alpes

Figure 11. – Coupe rase de taillis à coté d'une parcelle de taillis amélioré dans le Bas Dauphiné. Photo : S. Martel.

Dans le cas de ce projet, c'est une opération sylvicole visant à augmenter la séquestration de carbone en forêt et dans les produits bois qui est en partie financée par un mécène, l'association « la forêt pour témoin ». L'opération consiste en un balivage du taillis qui sera suivi d'une irrégularisation de la gestion. Elle s'applique à des taillis de châtaigniers du Bas Dauphiné en Rhône-Alpes, gérés jusqu'alors en taillis simples. Mis en place sur un territoire marqué par le morcellement des parcelles, cette initiative est rendue possible grâce à une association syndicale libre (ASL) qui regroupe les propriétaires. L'opération de balivage, réalisée lorsque les arbres de taillis ont 6 ans, est financée à 60 % par l'association mécène. En contrepartie, cette association se voit attribuer les droits carbone générés par le changement de gestion, par l'intermédiaire d'un contrat établi avec chacun des propriétaires. L'association se réserve le droit de vendre les crédits sur le marché volontaire si les outils nécessaires à la labellisation sont mis en place (CRPF Rhône Alpes, 2009).

Établi sur une dizaine d'hectares seulement, ce projet comporte un caractère expérimental intéressant et pourrait par la suite être étendu à des surfaces plus importantes (l'ASL couvre 600 ha). Ce projet de gestion forestière améliorée est une première en France. Il met en évidence l'intérêt de certains mécènes pour financer de tels types d'actions et constitue un bon exemple de regroupement des propriétaires.

1.3.1.3. Vers l'émergence de projets de taille plus importante?

Une fondation destinée à mettre en place des actions de compensation des émissions de gaz à effet de serre grâce à la forêt et au bois devrait voir le jour en Aquitaine. Dans un premier temps, les actions de compensation se mettront en place autour du reboisement faisant suite à la tempête Klaus, qui a mis par terre un tiers du massif des Landes selon les estimations de l'Inventaire forestier national (IFN). Des plans génétiquement améliorés seront utilisés : leur croissance initiale nettement plus importante que celle de plants traditionnels permettra au projet de remplir le critère d'additionnalité. La région Aquitaine, à l'origine de cette fondation devrait la doter d'un million d'euros afin de compenser les émissions liées à la construction de l'Autoroute Bordeaux-Pau. Divers entreprises et collectivités devraient en outre contribuer à cette fondation, qui pourrait faire émerger le premier

projet carbone réalisé à une échelle aussi importante en France. Cette initiative prendrait la forme de compensation volontaire par mécénat dans un premier temps, mais pourrait donner lieu à une mise sur le marché de crédits carbone certifiés dans un second temps (source : présentation de C. Pinaudeau lors du lancement du club carbone forêt-bois le 30 juin 2010).

Suite au lancement du club carbone forêt-bois, grâce à la synergie créée et aux outils développés, **il est probable que des projets de grande ampleur se développent**, aussi bien du coté de la forêt privée que de la forêt publique.

On pourra noter par ailleurs qu'une société, Capta Carbone, a été créée en 2007 en Bourgogne afin de proposer aux propriétaires forestiers de la région de valoriser la fonction de séquestration de carbone de leurs forêts (Capta carbone, 2010). Le principe de l'additionnalité ne semble pas être pris en compte dans les actions proposées par Capta Carbone, qui n'a d'ailleurs toujours pas mis en place de véritable projet carbone.

1.3.2. Une étude basée sur le réseau de sites pilotes France forêt

1.3.2.1. Présentation du réseau de sites

L'association France forêt a été créée début 2003 pour permettre aux forestiers de parler d'une seule voix sur tous les thèmes qui leur sont communs. Elle regroupe le Centre national de la propriété forestière (CNPF), la fédération des syndicats de propriétaires privés, l'ONF et la fédération nationale des communes forestières (FNCOFOR). Cette association a mis en place en 2007 un réseau de sites de démonstration « carbone ». Vingt-quatre sites forestiers ont été sélectionnés aussi bien en forêt publique que privée. D'une dizaine d'hectares chacun, ces sites sont représentatifs de la diversité de la forêt française. Chacun relève d'une problématique spécifique de gestion sylvicole : les sites sont situés dans différentes régions, ils sont constitués des principales essences forestières françaises et gérées selon divers traitements (voir annexe 2).

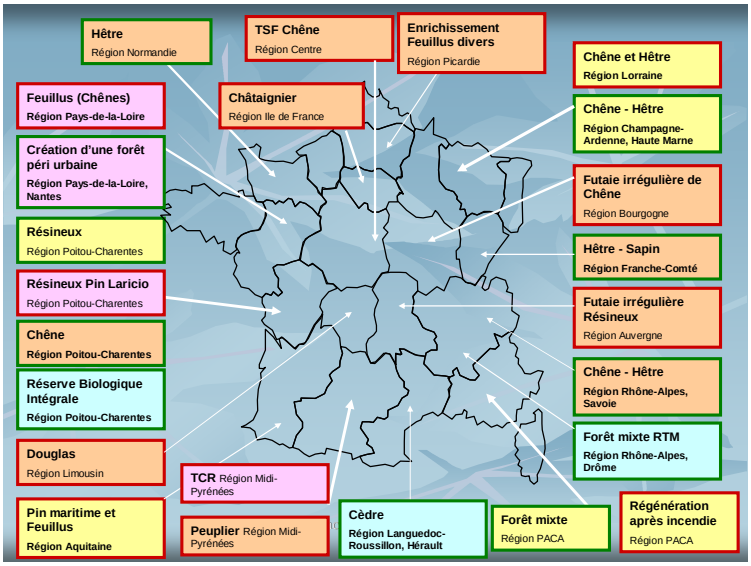


Figure 12. – Sites de démonstration « carbone » France-forêt.

Les objectifs de ce réseau de sites peuvent se décliner ainsi :

- Améliorer **la connaissance du bilan carbone** de la gestion forestière, en termes quantitatif et économique, à l'échelle d'une propriété forestière et identifier les leviers d'action du gestionnaire sur le bilan carbone.
- Identifier **les scénarios sylvicoles qui optimisent le bilan carbone** en forêt et quantifier l'impact des sylvicultures préventives (prévention des incendies de forêts, etc.).
- Mettre au point **des méthodes de mesure simples et rigoureuses** du carbone forestier.

À la base, ce réseau avait également vocation à être « pilote » dans la démarche de mise en place de projets domestiques de réduction des émissions de GES. Même si pour l'instant l'État français n'a pas souhaité mettre en place de projets domestiques forestiers, ce dispositif conserve tout

son intérêt du point de vue scientifique, mais aussi dans l'optique de la mise en place de projets volontaires.

1.3.2.2. Objectifs de l'étude

Concernant les forêts privées du réseau (17 sites), deux organismes sont responsables de leur expertise. Ces deux organismes ont encadré cette étude :

- **Forestiers privés de France**, qui est la fédération nationale des syndicats de forestiers privés. Son rôle est de représenter les propriétaires forestiers et la forêt privée auprès des instances nationales et européennes. Elle informe également les propriétaires sur les questions politiques, juridiques et économiques.
- **L'institut pour le développement forestier** (IDF) est le service recherche et développement du CNPF. Il réalise des travaux de recherche appliquée sur les méthodes de sylviculture pour une adaptation de plus en plus fine des forêts à leur environnement et au changement climatique.

La première partie du stage, basée à l'antenne IDF de Toulouse a consisté à mettre à jour les données de quatre sites pilotes de la forêt privée. En tant qu'organisme de recherche et développement au service de la forêt privée, l'IDF est amené à développer son expertise concernant la problématique du carbone. Alors que seules des données générales et un récapitulatif de l'historique avaient été recueillis sur les sites pilotes en 2008, un travail de quantification était nécessaire **afin de mieux connaitre l'influence de différents choix sylvicoles sur le bilan carbone forestier**. La mise au point d'une méthode de suivi de terrain de la séquestration du carbone s'avérait également importante pour vérifier les modélisations.

La seconde partie du stage qui s'est déroulée à la fédération nationale des syndicats a d'avantage concerné la valorisation économique du carbone forestier. La fédération, qui représente politiquement la forêt privée, souhaite faire reconnaitre le rôle joué par la forêt dans la lutte contre l'effet de serre et faire profiter les propriétaires de nouvelles sources de revenus. L'objectif de la seconde partie de cette étude est donc d'**explorer les possibilités de mise en place de projets carbone volontaires en France**. À partir des résultats acquis sur certains sites pilotes, des simulations de projets carbone ont été effectuées. Ce travail s'inscrit au sein de différentes études complémentaires menées par les organismes membres fondateurs du club carbone forêt-bois. La mise en commun de ces divers travaux devrait permettre à terme d'aboutir à l'élaboration de projets carbone volontaires.

2. Quantification de l'impact carbone de la sylviculture d'un peuplement forestier : recherche d'une méthode d'évaluation

Pour pouvoir comparer les bilans carbone de différents scénarios sylvicoles, **une méthode permettant de calculer un bilan carbone forestier est nécessaire.** Les méthodes existantes sont jugées non adaptées pour les raisons décrites ci-dessous.

- Certaines ont été mises au point dans le but d'effectuer des estimations à l'échelle de vastes territoires, comme dans le cas des bilans carbone forestiers nationaux (Dupouey *et al.*, 2010 ; Loustau, 2004).
- D'autres méthodes n'intègrent pas tous les éléments que l'on souhaite prendre en compte ici, comme l'aspect substitution (Vallet, 2005), ou ne sont pas adaptées à certaines essences (Robert, 2008).
- De nombreuses méthodes de quantification sont conçues pour des boisements et reboisement, mais sont mal adaptées à des itinéraires de gestion forestière améliorée (Reverchon, 2006 ; UNFCCC, 2008).
- Enfin, une méthode adaptée au peu de données disponibles sur ces sites pilotes et *a fortiori* en forêt privée était nécessaire.

Un premier travail a donc consisté en une revue de littérature pour élaborer une méthode de quantification du bilan carbone forestier qui soit applicable à des peuplements pour lesquels peu de données sont disponibles. Différentes études ont été combinées pour obtenir une méthode de quantification simple et fiable. Ce travail ne constitue cependant qu'un premier outil qui pourra ensuite être affiné par exemple par les travaux de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) qui met au point des chaines de modèle de quantification du carbone (Robert, 2008).

2.1. Hypothèses simplificatrices

2.1.1. Les stocks de carbone du sol sont considérés comme constants

Pour quantifier les stocks de carbone présents en forêt, différents compartiments (ou « pools » en anglais) sont généralement distingués : biomasse aérienne, biomasse souterraine, sol, litière et bois mort. La mesure du carbone dans le sol est difficile à appréhender car elle nécessite un échantillonnage et une analyse du taux de carbone des prélèvements. De même, il n'existe pas de modèle permettant d'évaluer l'évolution des stocks de carbone du sol en fonction de la sylviculture. Pour les cas considérés ici, l'usage de la terre ne change pas (quelque soit le scénario, la comparaison se fait toujours sur des forêts), ni même les essences en place. Seul le traitement sylvicole change entre les scénarios testés. Or, l'étude bibliographique de Lecocq *et al.* (2007) montre que l'impact du mode de gestion sur le stock de carbone du sol est toujours faible et le plus souvent non significatif. **La quantité de carbone dans le compartiment sol est donc considérée comme constante sur un site donné quels que soient les scénarios envisagés. Il en va de même pour le compartiment « litière ».** Les limites d'une telle hypothèse sont discutées dans le paragraphe 5.1. Une étude rassemblant des données issues de 713 placettes de différents réseaux d'observation des sols forestiers a permis d'évaluer un stock moyen de carbone selon le type de sol et l'essence en place (Nys *et al.*, 2008). Les valeurs moyennes calculées lors de cette étude sont données à titre informatif.

2.1.2. La biomasse du sous-étage est négligée

La biomasse du sous-étage est composée par la végétation naturelle qui colonise les strates inférieures du peuplement forestier : la strate herbacée, les ligneux bas, les mousses… On estime qu'elle représente en moyenne 1,6 % du stock total de carbone en forêt française (Dupouey *et al.*, 2010), soit une très faible part. En outre, la quantification de la biomasse du sous-étage et la

modélisation de son évolution sont délicates. Comme dans d'autres études (Vallet, 2005 ; Robert, 2008), **la biomasse du sous-étage est donc ici négligée.**

2.1.3. Échelle spatiale

L'approche choisie est locale et l'échelle de l'étude est celle du **peuplement** : les sites étudiés sont des parcelles d'une dizaine d'hectares.

2.1.4. Échelle temporelle

Sur chacun des sites, différents itinéraires sylvicoles sont testés et comparés. Or, ces itinéraires n'ont pas la même durée, ce qui entraine des difficultés pour leur comparaison sur un pas de temps donné. Nous nous intéressons donc aux **variations de stock** en établissant une **moyenne sur la durée de la révolution en régime stationnaire.** De plus, pour la comparaison du scénario de base avec des scénarios impliquant un changement de gestion, une phase de transition peut avoir lieu avant que le « rythme de croisière » du nouvel itinéraire soit pris. Dans le cas où cette période de transition excède cinq ans, on la prend en compte en comparant les deux itinéraires sur 100 ans.

Les émissions évitées par effet de substitution se cumulent **et dépendent donc de la durée de révolution : une moyenne annuelle** est calculée pour comparer différents scénarios.

2.1.5. Quantification prudente et conservatrice

Pour l'ensemble des calculs, l'approche choisie est prudente : **des hypothèses conservatrices sont appliquées**. Ainsi le stockage de carbone est plutôt sous-évalué que surévalué, afin de se prémunir d'une part contre les risques d'erreurs dans l'évaluation de la faisabilité d'un projet carbone, et d'autre part contre les erreurs possibles liées à l'emploi des outils de quantification lors des vérifications. Une telle estimation passe par la connaissance du volume total aérien et par le calcul des biomasses aérienne et racinaire.

2.2. Méthode de quantification des stocks de carbone forestier

Ce paragraphe vise à décrire comment estimer la biomasse des arbres et donc la quantité de carbone stockée en forêt, que ce soit à partir des données dendrométriques prédites par les simulations de croissance ou à partir de données dendrométriques mesurées sur le terrain. Une méthodologie d'inventaire forestier dont le but est d'estimer les stocks de carbone a par ailleurs été mise au point et testée pendant le stage (annexe 1).

2.2.1. Biomasse aérienne

2.2.1.1. Estimation du volume total : cas du Douglas, de l'Épicéa, du Sapin, du Mélèze, des pins, du hêtre et du Chêne

La biomasse aérienne est généralement estimée par l'utilisation de tarifs de cubage « volume total », aussi appelés **équations allométriques,** qui donnent le volume total aérien sur écorce d'un arbre en fonction de paramètres dendrométriques simples comme le diamètre (mesuré à 1,30 m) ou le couple hauteur-diamètre. En raison des différences morphologiques existant entre les arbres d'espèces variées ou ayant connu des conditions de croissance différentes, ces équations sont spécifiques aux essences (du moins en forêt tempérée) et parfois au mode de traitement. Zianis *et al.* (2005), puis Muukkonen et Mäkipää (2006) fournissent des revues de littérature des équations existant en Europe. En France, des équations allométriques ont été mises au point pour six essences par le LERFOB en 2006 (Vallet *et al.*). Ces équations font référence pour la forêt française et elles seront donc utilisées ici pour les essences concernées.

Le volume est exprimé en fonction d'un facteur de forme :

$$\mathbf{Vt} = \frac{1}{4\pi} \times \mathbf{c_{130}}^2 \times \mathbf{Ht} \times \mathbf{f}$$

Où :
Vt est le volume total en m^3,
$\mathbf{C_{130}}$ est la circonférence à 1,30 m en m
Ht est la hauteur totale de l'arbre en m
f est le facteur de forme, calculé selon :

$$\mathbf{f(c_{130},Ht)} = \left(\alpha + \beta \times c_{130} + \gamma \times \sqrt{\frac{c_{130}}{Ht}} \right) \times \left(1 + \frac{\delta}{c_{130}^2} \right)$$

Les paramètres α, β, γ et δ sont définis pour chacune des essences dans le tableau 1 ci dessous.

	Chênes	Douglas	Épicéa	Hêtre	Pins	Sapin
α	0,471	0,534	0,631	0,395	0,311	0,55
β	-0,000345	0,00053	-0,000946	0,000266	0,000405	-0,000749
γ	0,377	-	-	0,421	0,34	0,277
δ	-	56,6	-	45,4	191	-

Tableau 1. – Coefficients des équations allométriques. Source : Vallet *et al.*, 2006.

Ces équations ont été établies avec des données récoltées entre 1920 et 1955 et provenant pour la plupart de peuplements purs et réguliers (Vallet *et al.*, 2006). L'équation a été testée et validée sur des échantillons prélevés plus récemment, mais il est légitime de s'interroger sur leur validité lorsqu'elles sont appliquées à des traitements non réguliers. D'une part, le fait qu'il s'agisse de tarifs à double entrée (hauteur et diamètre) leur donne une robustesse accrue. D'autre part, Pignard (in Loustau, rapport carbofor 2004) a testé ces équations sur des données de placettes IFN dans des peuplements non réguliers. Connaissant les volumes bois fort de l'IFN, il obtient des facteurs d'expansion branche relatifs à ces équations qui sont proches de ceux que l'on trouve dans la littérature pour les traitements considérés. Ces équations sont donc également utilisées pour des arbres de futaie irrégulière ou de taillis sous futaie.

2.2.1.2. Estimation du volume total : cas du Châtaignier

Bien qu'étant la troisième essence feuillue française en termes de surface, **aucune équation allométrique spécifique n'existe pour le châtaignier** (Vallet, 2006 ; Zianis *et al.*, 2005). Le volume total est donc estimé grâce aux outils de cubage disponibles les plus pertinents. **Une étude bibliographique, présentée ci-dessous, a permis de recenser les travaux disponibles** sur le sujet.

Il est important de noter que les peuplements de châtaignier français comportent des arbres de conformations très différentes : les arbres des taillis non éclaircis ont un défilement faible et des houppiers étriqués tandis que les arbres des taillis qui ont été éclaircis ont des défilements forts et une branchaison plus importante. Cette hétérogénéité des morphologies d'arbres rend le choix d'une méthode de cubage adaptée d'autant plus difficile.

Figure 13. – Châtaigniers issus de taillis non éclaircis. Photo : S. Martel

Les différentes méthodes qui peuvent permettre d'établir le volume total des châtaigniers à partir de leur diamètre et de leur hauteur sont les suivantes :

- L'équation allométrique « feuillus divers » de Vallet *et al.* (2006). Celle-ci a été mise au point sur des données « chêne » et « hêtre », et bien qu'ayant été validée sur un échantillon de frêne, il parait hasardeux de l'utiliser pour le châtaignier, surtout pour des arbres de taillis. La morphologie des châtaigniers de taillis éclaircis se rapprochant de celle d'arbres de futaie, l'application de cette équation pourrait s'envisager pour ce cas.

- Un tarif de cubage « volume bois fort » couplé à des facteurs d'expansion qui donnent le volume des branches de moins de 7 cm de diamètre (volume V7). Le tarif de cubage « volume bois fort » de Lemaire (2008) a été validé pour l'ensemble des taillis en France et correspond bien à ce que l'on attend ici. Les auteurs ont testé ce tarif sur un ensemble de peuplements et ont montré qu'il surestimait les volumes de 4 % pour les taillis non éclaircis et de 10 % pour les taillis éclaircis. Ces biais doivent être pris en compte en réajustant les prévisions à la baisse. En revanche, pour ce qui est des facteurs d'expansion, ceux établis lors du projet Carbofor (Loustau, 2004) ont été calculés à partir de la comparaison de données IFN aux résultats obtenus grâce à l'équation allométrique « feuillus divers de Vallet *et al.* (2006). Leur utilisation parait donc délicate, d'autant plus qu'ils donnent les valeurs de volume les plus élevées.

  Auclair et Bige (2004) fournissent quant à eux une équation permettant le calcul de la biomasse des taillis de la région Centre à partir des données de volume bois fort de l'IFN. Bien que n'étant pas spécifique au châtaignier, le facteur d'expansion fourni par cette étude pourrait s'appliquer dans le cas présent aux arbres des taillis non éclaircis.

- Le tarif de cubage « volume total tige» établi en Italie par l'Inventario forestale regionale (IFR, 2000). Ce tarif de cubage permet de cuber la tige jusqu'au bourgeon terminal mais il ne prend malheureusement pas en compte les branches. Une méthode complémentaire de calcul de la biomasse des branches est donc indispensable si ce tarif est utilisé.

- La thèse de Sabatier-Tarrago (1989) apporte des éléments intéressants concernant les tarifs de cubage de châtaignier, et notamment des tarifs « biomasse totale » établis par des mesures destructives sur des taillis d'Ile de France. Ces travaux distinguent un tarif de cubage « biomasse tige » (très proche du tarif italien IFR) et deux tarifs pour les branches selon que l'arbre a plus ou moins de 26 ans. Ces équations ont été bâties à partir d'un échantillon de 87 individus provenant de 6 forêts différentes d'Ile de France.

La figure 14 compare les volumes donnés par certaines des méthodes décrites ci-dessus pour différents couples diamètre-hauteur modélisés pour un arbre de taillis non éclairci en station de fertilité 2 (selon les classes de fertilité de Lemaire, 2008).

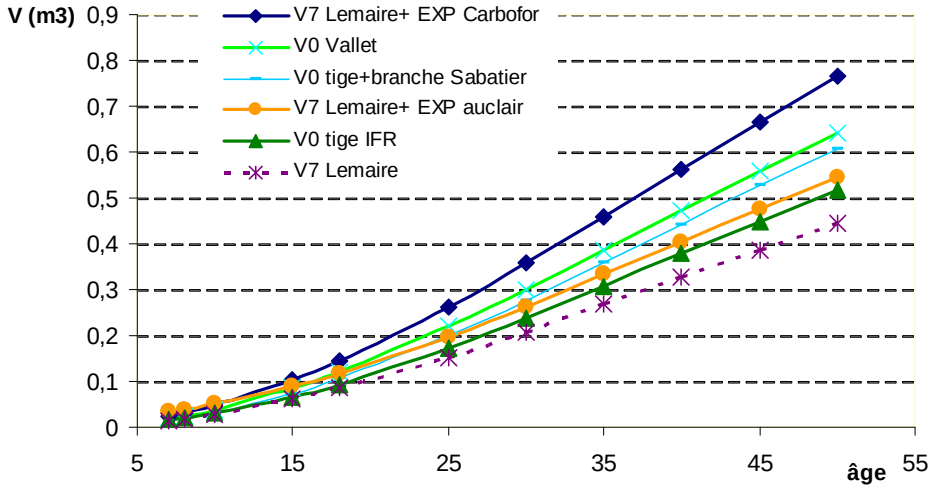


Figure 14. – Comparaison des méthodes de cubage de taillis de châtaignier (arbre du témoin de la classe de fertilité 2)

Ce graphique met avant tout en évidence la variabilité des volumes estimés selon la méthode qui est employée. Les différences entre les volumes sont plus importantes pour des âges élevés. De façon logique, les équations de Lemaire et de l'IFR donnent des résultats inférieurs puisque ces équations ne donnent qu'une partie du volume total. La combinaison des tarifs Lemaire (2008) avec le facteur d'expansion d'Auclair et Bige (2004) donne les volumes totaux les plus forts dans le jeune âge et des volumes faibles après 15 ans. **Les tarifs de cubage de Sabatier-Tarrago seront utilisés pour cette étude** car ils semblent plus adaptés que les autres méthodes (ils ont été construits à partir de mesures effectuées dans la région de l'étude de cas de ce travail) et parce qu'ils donnent des valeurs de volumes totaux plus faibles (hypothèse conservatrice). Ces tarifs ont été construits à partir de mesures sur des arbres de taillis non éclaircis. Ils sont également utilisés pour les châtaigniers issus de taillis éclaircis, alors que ces derniers ont -à hauteur et diamètre égaux- un volume de branche plus important. On sous-estime ainsi le carbone séquestré par l'itinéraire alternatif (voir paragraphe 3.2.) : il s'agit donc d'une hypothèse conservatrice.

Toutefois, les résultats donnés en utilisant cette méthode pourront être largement améliorés si une équation allométrique spécifique au châtaignier est publiée.

2.2.1.3. Estimation de la biomasse aérienne à partir du volume

Connaissant le volume total des arbres, **la biomasse aérienne peut être calculée grâce à l'infradensité du bois**. L'infradensité se définie comme le ratio entre une masse de bois anhydre et son volume de bois frais. Bien que l'infradensité varie selon de nombreux paramètres, comme l'âge et la largeur de cerne (Le Moguedec, 2000), on fixe par convention une unique valeur d'infradensité par essence. On utilise les valeurs d'infradensité recommandées par le **GIEC (2003).** Les valeurs relatives aux principales essences forestières françaises sont représentées dans le tableau 2.

Espèce ou genre	Abies	Acer	Alnus	Betula	Carpinus betulus	Castanea sativa	Fagus sylvatica	Fraxinus	Juglans	Larix decidua
Infradensité (t/m3)	0,4	0,52	0,45	0,51	0,63	0,48	0,58	0,57	0,53	0,46

Espèce ou genre	Picea abies	Pinus pinaster	Pinus strobus	Pinus sylvestris	Populus	Prunus	Pseudotsuga menziesii	Quercus	Salix	Tilia
Infradensité (t/m3)	0,4	0,44	0,32	0,42	0,35	0,49	0,45	0,58	0,45	0,43

Tableau 2. – Infradensité des principales essences françaises. Source : GIEC, 2003.

On a donc :

$$\mathbf{Ba = Vt \times d_i}$$

Où :
Ba est la biomasse aérienne en t/ha,
Vt est le volume total aérien en m^3,
$\mathbf{d_i}$ est l'infradensité de l'essence i considérée.

2.2.2. Biomasse racinaire

La mesure directe de la biomasse racinaire est beaucoup trop laborieuse et coûteuse pour pouvoir être réalisée. C'est pourquoi **on estime souvent cette dernière à partir de la biomasse aérienne.** Des études donnent des ratios entre biomasse aérienne et racinaire spécifiques à certaines essences. C'est le cas du travail de Drexhage (2001) pour le Douglas. Des équations génériques valables pour toutes les essences ont également été établies par Cairns *et al.* (1997). Elles sont le résultat d'une synthèse bibliographique réalisée à partir de nombreuses publications concernant les rapports biomasse aérienne/biomasse souterraine. Les vérifications montrent qu'elles donnent des résultats satisfaisants, même si ces équations mériteraient d'être actualisées et affinées à partir de travaux plus récents. Elles sont par ailleurs utilisées pour la plupart des projets carbone dans le monde et sont recommandées par le GIEC. **Les équations de Cairns *et al.* (1997) sont donc utilisées ici.**

L'équation retenue est :

$$\mathbf{Br = e^{[-1,0587+36 \times \ln (Ba) +0,284]}}$$

Où :
Br est la biomasse racinaire en t/ha,
Ba est la biomasse aérienne en t/ha.

2.2.3. Quantités de carbone

Bien qu'il existe des variations inter- et intra-spécifiques (Vallet, 2005), le taux de carbone dans la matière sèche est généralement considéré comme étant constant. Les valeurs retenues dans les différentes études sont comprises dans une fourchette allant de 0,45 à 0,5. Dans le cadre de cette étude, nous utiliserons pour l'ensemble des calculs **la valeur tirée du rapport Carbofor (Loustau, 2004) qui est fixée à 0,475.** Ce qui donne :

$$\mathbf{S = 0,475 \times (Br + Ba)}$$

Où :
S est la quantité de carbone contenue dans un arbre en tonnes,
Br et Ba sont respectivement les biomasses racinaire et aérienne de l'arbre en tonnes.

2.2.4. Quantités de dioxyde de carbone

Les quantités de carbone peuvent par la suite être converties en quantités de dioxyde de carbone (CO_2). On a :

$$\mathbf{Q = S \times \frac{44}{12} \approx S \times 3,67}$$

Où :
Q est la quantité de CO_2 séquestrée en tonnes,
S est la quantité de carbone séquestrée en tonnes.

2.3. Prolongation du stockage dans les produits bois

2.3.1. Répartition du bois exploité en différentes catégories de produits

Classiquement, lors des exploitations forestières, seul le bois fort, de diamètre supérieur à 7 cm, est prélevé. Le bois de petite taille (les rémanents) est laissé en forêt. Ce bois se décompose et une partie du carbone est progressivement réémise dans l'atmosphère alors que l'autre partie est incorporée au sol. Ces mécanismes étant complexes à prendre en compte, l'hypothèse simplificatrice considérée est que **le carbone contenu dans les rémanents est réémis au moment de l'exploitation**.

En ce qui concerne le bois commercialisé, il est nécessaire de connaitre pour chaque coupe les utilisations qui vont en être faites. Le bois exploité se valorise généralement en différentes catégories de produits. La répartition dans ces catégories de produits dépend de nombreux paramètres dont notamment le diamètre et la qualité des arbres prélevés, ainsi que le contexte local de la filière bois. Les enquêtes annuelles de branche réalisées par le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Pêche fournissent des données sur les débouchés par essence et par département, mais elles ne sont pas toujours assez précises et ne couvrent pas toutes les essences. **Cette répartition en catégories de produits sera donc donnée à « dire d'expert »,** et validée par les acteurs locaux de la commercialisation du bois.

L'utilisation d'une telle méthode présente des limites et pose deux questions. La première concerne la vérification du « dire d'expert ». Il est très difficile d'avoir un suivi des bois exploités. Les grumes issues d'une coupe peuvent passer entre les mains de plusieurs intermédiaires et faire l'objet de plusieurs tris avant d'être réellement transformées. Même si les systèmes de certification permettent une meilleure traçabilité, il est souvent difficile de connaitre l'usage qui sera fait du bois *in fine*. La seconde limite de la méthode porte sur l'objectivité de ce « dire d'expert ». Les acteurs interrogés peuvent avoir tendance à amplifier la part de bois destiné à des usages « nobles », ce qui conduirait à

exagérer les bénéfices carbone d'un projet. Dans le cas de l'utilisation de cette méthodologie pour un projet carbone, l'indépendance des « experts » poserait également problème.

2.3.2. Durée de vie des produits

La durée de stockage du carbone dans les produits issus de la transformation du matériau bois varie selon le type de produit et l'utilisation qui en est faite. Il existe deux méthodes principales pour mesurer la durée de vie des produits bois : la durée de vie moyenne et la demi-vie. La littérature concernant la durée de vie des produits bois selon l'une de ces deux méthodes est relativement abondante dans les pays développés, mais l'incertitude sur les données reste très importante (Lecocq *et al.*, 2007).

Le point de vue retenu ici pour le calcul des durées de vie des produits est celui du forestier qui veut connaître le prolongement du stockage dans les produits bois issus de la forêt. L'approche pertinente est donc d'utiliser des **durées de vie apparentes** : il s'agit de la durée de vie moyenne d'un billon de bois sortant de la forêt. Cette notion intègre à la fois la durée de vie des produits finis chez le consommateur (par la durée de vie moyenne ou demi-vie), les rendements des différentes étapes de transformation et le recyclage des déchets de transformation ou des produits en fin de vie.

Vallet (2005) a calculé des durées de vie apparentes pour 5 « sous filières » en se basant sur des données de durée de vie des produits fournies par Paquet et Deroubaix (2003) d'une part et sur les coefficients de rendement de la thèse de Selmani (1992) d'autre part. Le recyclage des déchets issus de la transformation et des produits en fin de vie est pris en compte en supposant que le bois est systématiquement réintégré dans les filières papier-carton et bois-énergie. Toutefois, du fait de l'incertitude sur la part des produits recyclés et sur la durée de vie des recyclats, les durées de vie apparentes sont présentées avec et sans recyclage. Les résultats de Vallet sont les suivants :

	Construction	**Ameublement**	**Emballage**	**Papier-carton**	**Bois-énergie**
Durée de vie apparente avec recyclage	**9,1 ans**	**8,5 ans**	**3,9 ans**	**2,4 ans**	**1,7 ans**
Durée de vie apparente sans recyclage	**7,1 ans**	**6,5 ans**	**1,9 ans**	**2 ans**	**-**

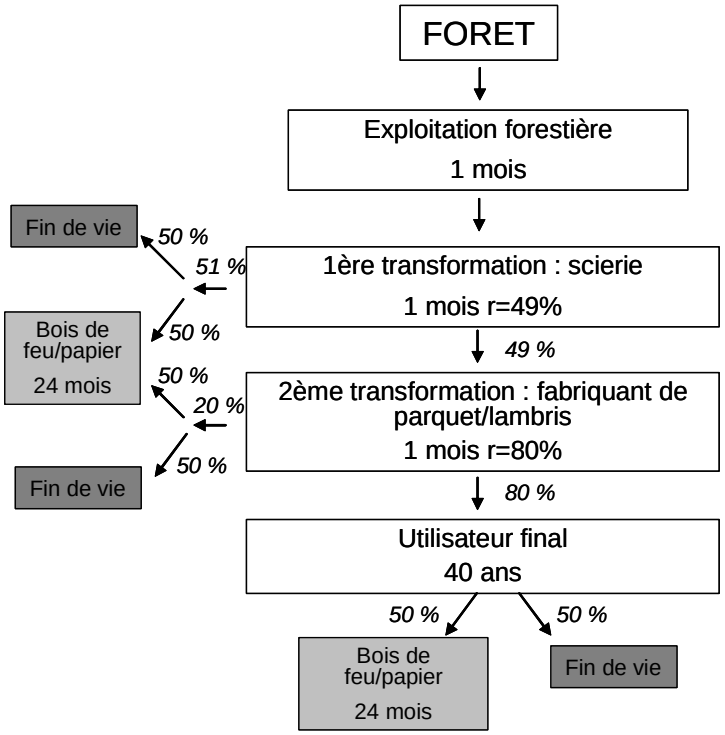
Tableau 3. – Durées de vie apparentes par sous-filière (source : Vallet, 2005)

Cependant, **ces durées de vie apparentes calculées par sous-filière peuvent lisser les différences existant entre les durées de vie de produits d'une même sous filière.** Par exemple dans la sous filière « construction », les éléments de structure (charpente, plancher…) ont une durée de vie moyenne par les utilisateurs finaux de 75 ans alors qu'elle n'est que de 15 ans pour les produits de type « aménagement » (FCBA, 2008). Le calcul des durées de vie par sous-filière pénalise ainsi une sylviculture qui produirait majoritairement des bois de structure.

C'est pourquoi, afin d'avoir des durées de vie plus précises, la démarche de Vallet est appliquée à chaque type de produits issu des forêts étudiées. Cette approche demande des informations plus précises sur le devenir du bois exploité. Toutefois, les utilisations du bois sont souvent localement bien connues des sylviculteurs, ce qui résout le problème. C'est la répartition dans les différentes catégories de produit données « à dire d'expert » qui présente de nombreuses limites décrites dans la partie 2.4.1.

Les données des durées de vie utilisées sont celles fournies par l'étude du FCBA (2008) sur les stocks de carbone dans les produits bois à l'échelle française. Les rendements appliqués sont soit issus de cette même étude, soit issus de Selmani (1993). Concernant le recyclage, on suppose une réutilisation de la moitié des déchets de transformation et des produits en fin de vie en bois de feu et papier. Au final, cela équivaut à une prolongation de la durée de vie des produits d'un an par rapport à une hypothèse de non recyclage.

La figure 15 illustre le calcul de la durée de vie apparente dans le cas du parquet/lambris.



La durée de vie d'un billon valorisé en parquet/lambris est de :

1 mois

+

1 mois + 51% × 50 % × 24 mois

+

49 % × 1 mois + 49 % × 20 % × 50 % × 24 mois

+

49 % x 80 % x (40 x 12 mois + 50 % x 24 mois)

Soit 215 mois ou **17,9 années**

Figure 15. Cycle de vie du produit « parquet/lambris ».

Une exception est faite concernant les bois de trituration destinés aux usines de panneaux : en général, le sylviculteur sait que son bois est destiné aux industries du panneau, mais il ne sait pas quel sera le produit final formé à partir de son bois car les débouchés sont nombreux (voir figure 16). La durée de vie est donc calculée à partir des durées de vie apparentes données par Vallet (2005) au prorata de l'utilisation des panneaux dans chaque sous-filière (source UIPP).

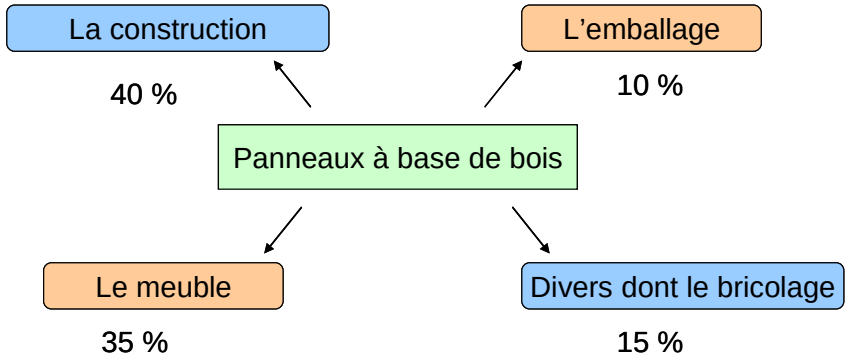


Figure 16. – Utilisation des panneaux en France. Source : UIPP.

Les durées de vie obtenues sont les suivantes :

Structure	Parquet lambris	Menuiserie	Placage	Trituration (usage : meuble)	Emballages lourds	Piquet	Palissades extérieures	Papier carton	Bois energie
31,6 ans	**17,9 ans**	**9,1 ans**	**10,5 ans**	**7,7 ans**	**4,3 ans**	**4,2 ans**	**3,7 ans**	**2,2 ans**	**1,7 ans**

Tableau 4. – Durées de vie apparentes par produit.

Ces durées de vie sont ici considérées comme constantes, ce qui est une hypothèse très théorique. Elles vont servir à estimer la prolongation du stockage de carbone dans des produits bois formés à partir de peuplements qui n'arriveront à maturité que dans plusieurs décennies. Or, les durées

de vie, tout comme les catégories de valorisation du bois auront peut être changé pour diverses raisons : changement des habitudes de consommation, transformation des circuits de recyclage… C'est donc une importante limite de la méthode qu'il convient de prendre en considération.

2.3.3. Répartition temporelle des stocks des produits

Les durées de vie apparentes calculées dans le paragraphe ci-dessus sont des moyennes. L'utilisation d'une loi de durée de vie permet de renseigner la répartition temporelle des pertes et d'obtenir un « taux de survie » de la matière et donc du carbone. C'est la loi de Weibull, ayant pour espérance la durée de vie apparente et dont le paramètre β est fixé à 2 qui est la plus adaptée au problème (Vallet, 2005 ; Robert, 2008).

On a donc le taux de survie suivant : $\mathbf{T(x)} = e^{\frac{-\pi}{4}\left(\frac{x}{m}\right)^2}$ où m est la durée de vie apparente du produit et x l'année en cours.

La figure 17 est un exemple théorique qui illustre les calculs présentés ci-dessus. Il s'agit de la séquestration de carbone au cours du temps d'un billon d'un mètre cube de châtaignier valorisé pour moitié en parquet/lambris et pour l'autre moitié en menuiserie.

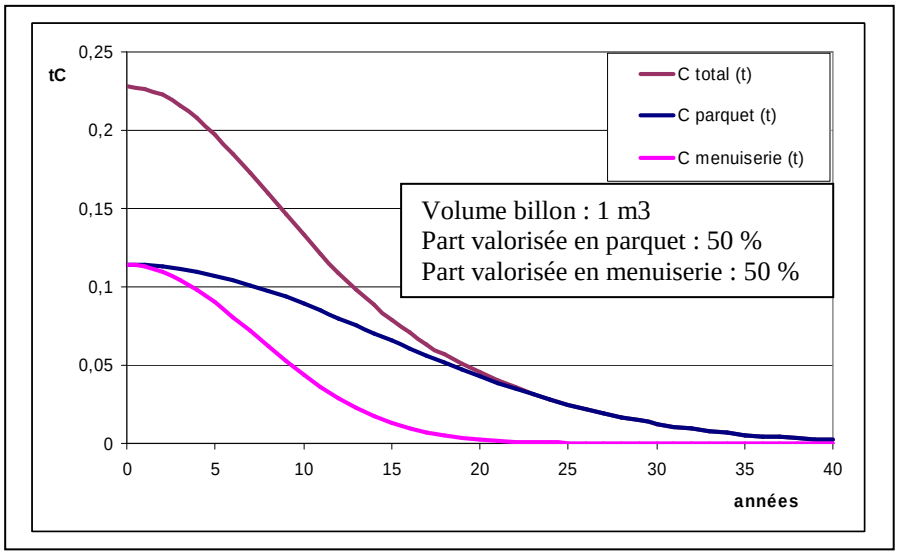


Figure 17. – Séquestration du carbone dans un billon de châtaignier.

On notera que l'utilisation d'autres méthodes employées par ailleurs dans des projets carbone (Winjum *et al.*, 1998 ; méthode proposée par le Chicago climate exchange) auraient peut-être permis de simplifier la démarche. Ces méthodes considèrent que chaque tonne de carbone contenue dans les produits-bois qui n'a pas été réémise dans l'atmosphère cent ans après la récolte correspond à une émission évitée de la même quantité de carbone. Ces méthodes ont l'avantage d'être plus simples dans leur mise en œuvre mais elles soulèvent le problème de l'équivalence entre tonnes de carbone séquestrées et tonnes de carbone non émises (voir annexe 6).

2.4. Effet de substitution

Dès lors qu'il est issu de forêts gérées durablement, le bois utilisé comme source d'énergie ou comme matériau a un impact positif sur le climat. Il se substitue en effet à des produits plus coûteux en termes d'énergie fossile.

2.4.1. Substitution énergétique

Même si le pouvoir calorifique du bois est faible au regard d'autres combustibles (Leturcq, 2010), son utilisation comme source d'énergie est neutre vis-à-vis du carbone. Dans les forêts gérées de manière durable, hypothèse communément admise pour la France, les émissions de CO_2 liées à la combustion du bois sont compensées par la croissance des arbres. En dehors des émissions engendrées par son transport et sa transformation, la matière première « bois » est donc neutre vis-à-vis du climat. Le bois, utilisé comme source de chaleur, se substitue bien souvent à des énergies fossiles. Son utilisation permet donc d'éviter des émissions de carbone dont la genèse a nécessité des millions d'années.

Cet effet de substitution dépend de plusieurs facteurs :

- **de la réalité de la substitution**. Pour qu'il y ait effet de substitution et réduction d'émissions de CO_2 associées, le bois doit effectivement remplacer une énergie fossile et non simplement s'ajouter à celle qui était produite jusqu'alors ;
- **du secteur d'utilisation de l'énergie où a lieu la substitution** (habitat individuel, collectif, tertiaire, industrie, électricité, chaleur ou, de manière anecdotique pour le moment, les transports) ;
- **de la technologie utilisée pour la production d'énergie** à base de produits bois. En effet les rendements de conversion en énergie peuvent varier énormément, et dépendent beaucoup du type d'énergie finale ;
- **de la filière effectivement remplacée**. Il est clair que, du point de vue du CO_2, la substitution d'énergie nucléaire par de la biomasse n'a rien à voir avec celle de vieilles centrales à charbon... Le type d'énergie final est déterminant.

Pour calculer le taux de substitution, c'est à dire les émissions de CO_2 évitées par tonne de bois énergie utilisé, différentes hypothèses sont posées.

- Nous posons l'hypothèse que l'augmentation de consommation de bois énergie s'effectue en France pour le chauffage et qu'elle entraîne une diminution de la consommation d'énergies fossiles suivant la répartition actuelle dans le secteur, soit 1 % de charbon, 39 % de gaz naturel et 60 % de fioul (lourd et domestique) (d'après les statistiques de l'INSEE 2006). L'hypothèse de non-substitution de l'électricité provient du fait que le développement du bois énergie est attendu dans des chaufferies collectives utilisant des énergies fossiles. Une telle hypothèse demanderait toutefois à être validée a posteriori, en particulier concernant les centrales de cogénération : on substitue dans ce cas de façon certaine le bois énergie à de l'électricité. La filière de production d'électricité devrait alors également faire l'objet d'une étude pour déterminer la part produite à partir d'énergie fossile.
- L'utilisation du bois pour le chauffage se fait sous la forme de bois énergie en plaquettes à 20 % d'humidité, ce qui correspond à un séchage à l'air libre. Le contenu énergétique d'une tonne de ces plaquettes est fixé à 2,93 kWh (ADEME, 2007). Le rendement considéré lors de la transformation de la biomasse (bois rond) en plaquettes est de 90 %. L'hypothèse d'utilisation du bois exclusivement sous forme de plaquettes est discutable car une quantité importante de bois est toujours utilisée sous forme de bois-buche, pour lequel les rendements énergétiques sont généralement plus faibles. Toutefois, cela se justifie concernant l'effet de substitution additionnel car la production supplémentaire de biomasse énergie a toutes les chances de se développer sous des formes « fluides » de type plaquette.
- Les facteurs d'émission sont tirés d'une étude de l'ADEME (2007) et tiennent compte des émissions liées à la transformation et au transport des combustibles. C'est ainsi que le facteur d'émission net du bois n'est pas nul.

Combustible	**bois**	**charbon**	**gaz naturel**	**fioul domestique**
Facteur d'émission brut (kg eqC/kWh)	0	0,093	0,056	0,074
Facteur d'émission net (kg eqC/kWh)	0,004	0,101	0,063	0,082

Tableau 5. Facteurs d'émission de différents combustibles.

Les taux de substitution qui résultent de l'utilisation du bois à la place de l'un de ces combustibles sont donnés dans le tableau 6 suivant :

Combustible	Charbon	Gaz naturel	Fioul domestique
Émissions évitées par l'utilisation d'une tonne de bois (teqC/m^3)	0,26	0,16	0,21

Tableau 6. Taux de substitution.

Le taux de substitution retenu est calculé au prorata des combustibles actuellement utilisés comme bois de chauffage (voir ci-dessus) : **0,19 t eqC/m^3.** Ces valeurs peuvent être comparées aux chiffres trouvés dans la littérature : Werner (2004) pour la Suisse et Robert (2008) donnent des valeurs légèrement supérieures (respectivement **0,22 t eqC/m^3 et 0,32 t eqC/m^3**). De son coté, Dameron (2004) propose une fourchette de valeurs comprises entre **0,19 et 1,06 t eqC/m^3**. Au vu des données disponibles dans la littérature, **l'approche retenue ici est donc conservatrice.**

2.4.2. Substitution matériau

C'est grâce à l'énergie solaire que le matériau bois est « produit » par les arbres, alors que c'est principalement grâce aux énergies fossiles que l'homme produit des matériaux comme le béton ou l'acier. Avant leur utilisation finale, ces matériaux vont subir un ensemble de transformations et de transports, eux-mêmes très consommateurs d'énergie. La substitution indirecte provient du fait que la production et la transformation du bois-matériau engendre, dans la plupart des cas, de moindres consommations d'énergie que d'autres matériaux comme le béton, l'acier ou l'aluminium. Cette moindre consommation d'énergie engendre de façon logique de plus faibles émissions de CO_2.

Pour la substitution indirecte, on peut retenir les mêmes critères que pour la substitution directe. Elle dépend en effet :

- **de la réalité de la substitution** ;
- **du secteur d'utilisation où a lieu la substitution**. Deux grandes catégories de service final représentent l'essentiel des services pour lesquels la substitution indirecte est significative. Il s'agit du secteur du bâtiment, et celui des infrastructures extérieures ;
- **de la technologie utilisée** pour la production de l'énergie nécessaire à la fabrication des matériaux ;
- **du produit final concerné** : poutre, poteau, fenêtre, etc.

La littérature n'est pas très abondante en ce qui concerne les émissions de CO_2 des secteurs concurrents du bois. Des bilans comparant les émissions constatées lors de la fabrication des matériaux « bruts » sont disponibles. Ils ne sont cependant pas très pertinents car ils ne tiennent pas compte des nombreuses émissions liées à la transformation du matériau jusqu'à son usage final.

Les publications disponibles sont souvent des études de cas individuels, comme le montrent les revues bibliographiques de Früwald *et al.* (2003) et Petersen (2005). Les résultats présentent ainsi une très grande variabilité liée au matériau substitué et à la nature de la construction. Ils vont de valeurs négatives dans certains cas (l'utilisation du bois entraîne de plus grandes émissions de CO_2), à des valeurs positives très importantes (au-delà de 10 tCO_2 par m^3 de bois utilisé). Enfin, les valeurs données dans ces études ne sont pas forcément homogènes ou comparables sans passer par des facteurs de conversion (qui souffrent eux aussi de marges d'erreurs importantes).

On retiendra au final pour la substitution dans le secteur de la construction le chiffre global issu de l'accord cadre « bois construction environnement » : **l'utilisation d'1 m^3 (sorti forêt) de bois supplémentaire dans le secteur de la construction permet d'éviter les émissions de 0,22 teqC soit**

0,8 teqCO_2. Cette valeur est en cohérence avec le coefficient retenu par Robert (2008) : 0,475 teqC par tonne de bois anhydre soit 0,24 teqC/m^3 pour une infradensité moyenne du bois de 0,5.

Les valeurs de taux de substitution dépendent d'une multitude de paramètres : elles sont donc très théoriques. Non seulement il n'est pas facile de connaitre les valorisations des arbres exploités (voir paragraphe 2.4.1.), mais il est aussi très difficile de prédire quel matériau sera substitué par le bois. De plus, les processus de production des matériaux concurrents du bois sont susceptibles d'évoluer dans le futur et rendront alors ces valeurs obsolètes. Toutes ces limites de la méthode de quantification des émissions évitées par effet de substitution montrent que ces valeurs ne doivent être utilisées qu'à titre informatif. Cet effet est néanmoins un élément clé du bilan carbone forestier et ne doit pas être oublié pour autant. Les travaux menés actuellement sur les analyses de cycle de vie des différents matériaux (dont le bois) devraient permettre d'améliorer de telles estimations.

2.5. Quantification des émissions de gaz à effet de serre liées aux activités forestières

Pour être le plus complet possible dans le bilan carbone de peuplements forestiers, il est nécessaire de prendre en compte **les flux d'énergie fossile liés aux opérations sylvicoles qui ponctuent la vie des forêts gérées et exploitées**. Ce sont des émissions qui sont principalement liées aux opérations de plantation (le cas échéant) et de prélèvement de bois. Par simplification, les émissions de gaz à effet de serre liées aux activités de gestion (par exemple les déplacements du gestionnaire ou du propriétaire) seront négligées : elles sont très difficilement quantifiables et à l'échelle d'un peuplement, elles peuvent être considérées comme très faibles. De plus, dans le cadre d'une comparaison entre deux scénarios de gestion, ces activités seront faiblement modifiées et resteront donc du même ordre de grandeur.

Les émissions liées aux différentes phases de transformation du bois seront quant à elles considérées lors de la quantification de l'effet de substitution.

2.5.1. À partir de données relevées lors des opérations sylvicoles

Les sources d'émission de carbone sont de deux types : les émissions dues à la consommation directe d'énergie fossile par les machines employées et les émissions liées à l'utilisation de matériaux à forte valeur énergétique ou dont la fabrication mobilise beaucoup d'énergie fossile (engrais, huiles hydrauliques, huiles lubrifiantes). Pour avoir un bilan complet, il est donc nécessaire de connaitre pour chaque opération :

- les machines utilisées (tracteur avec gyrobroyeur, tronçonneuse, abatteuse, débardeur…) et leur consommation moyenne ;
- le temps d'utilisation de ces machines ;
- les quantités d'huiles ou engrais utilisées.

Des facteurs d'émission (ADEME, 2007) sont utilisés afin de connaître les quantités de CO_2 émises lors de chaque opération (tableau 7).

Carburant ou consommable	PCI (Gj/t)	Facteur d'émission (kg eqC/L)
Essence	44	0,66
Gazole	42	0,73
Huile lubrifiante	40	0,89

Tableau 7. – facteurs d'émission. D'après les données ADEME (2007).

Les données nécessaires pour établir un tel bilan sont malheureusement peu souvent disponibles sur les sites étudiés, c'est pourquoi le recours à des facteurs d'émissions génériques par type d'opération est nécessaire.

2.5.2. À partir de facteurs d'émission génériques par type d'opération

Les consommations spécifiques d'énergie répertoriées par Prieur (2004) à partir de trois sources bibliographiques sont utilisées. L'étude de Prieur concerne des émissions constatées pour la sylviculture du pin maritime dans les Landes et l'application de telles données au reste de la France est discutable. La sylviculture du pin maritime des Landes est en effet intensive (utilisation d'engrais, coupes mécanisées généralisées…) au regard des sylvicultures pratiquées ailleurs et les émissions risquent donc d'être surestimées. Ainsi, l'utilisation des valeurs fournies par la thèse de Prieur peut être jugée comme étant une approche conservatrice. Le tableau 8 présente les valeurs retenues.

Opération	Consomation spécifique d'énergie externe (MJ/U)	Type d'énergie finale	Emissions (teqC/U)	Unité de référence, U
Préparation des plants en pépinière	4002	Carburant : 14 % Phytosanitaires/engrais : 86%	0,12	ha
Plantation sans préparation du sol	3955	Carburant : 100 %	0,10	ha
Plantation avec préparation du sol et fertilisation azotée	41429	Carburant : 100 %	1,03	ha
Récolte	62	Carburant : 90 à 95 % Huiles : 5 à 10 %	1,44E-03	m^3
Débardage et transport	38	Carburant : 90 à 95 % Huiles : 5 à 10 %	8,85E-04	m^3

Tableau 8. – Émissions liées aux différentes opérations sylvicoles. D'après Prieur, 2004

Dans le cadre du bilan carbone des forêts de l'École nationale du génie rural, des eaux et des forêts (ENGREF) un chantier « témoin » a eu lieu en forêt de Brin en 2008 (stage d'Yves Lesniewski, LERFOB). Le suivi des consommations des engins (tronçonneuse, débusqueur, porteur et grue des grumiers) a permis d'évaluer de façon précise les émissions de ce chantier d'exploitation :

- abattage et billonnage : $2{,}9.10^{-4}$ teqC/m^3 ;
- débardage : $1{,}16.10^{-3}$ teqC/m^3 ;
- manutention des grumes : $1{,}14.10^{-3}$ teqC/m^3.

Même si les ordres de grandeur sont les mêmes, la comparaison des données de Prieur et de ceux obtenus grâce à ce chantier pilote met en évidence des variations importantes des émissions selon le type de machine utilisée et le type d'intervention pratiqué (éclaircie, coupe rase…). La mise en place d'autres chantiers témoin de ce type et la création d'un référentiel des émissions suivant les types de pratique permettrait une significative amélioration de la qualité des bilans carbone des opérations sylvicoles.

Figure 18. – Chantier d'exploitation en forêt du Nouvion.
Photo : S. Martel

Compte tenu des faibles valeurs obtenues ici, **les émissions engendrées par les activités sylvicoles seront négligées par la suite.**

3. Étude de cas sur deux sites du dispositif France-Forêt

En appliquant la méthodologie mise en place, l'impact de plusieurs choix sylvicoles sur le bilan carbone a été estimé en se basant sur quatre sites France forêt. L'expertise menée sur un site de taillis de châtaignier et sur un site de Douglas géré en futaie régulière est présentée dans cette partie. Les fiches techniques des autres sites (futaie irrégulière de Douglas et plantation de chêne) se trouvent en annexes 4 et 5.

3.1. Site de Gaudeix : futaie régulière de Douglas

3.1.1. Description du site

Ce site fait partie de la propriété de 130 ha du groupement forestier de Gaudeix, située sur les communes de St Sulpice Laurière et Laurière en Haute-Vienne. Il correspond à une petite partie de la forêt : une plantation de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) établie en 1980 sur les trois parcelles cadastrales (voir figure 19).

Ces parcelles ont été plantées en 1980 pour remplacer un taillis de châtaignier et des accrus de chêne et de hêtre de mauvaise qualité abandonnés depuis plus de 30 ans. Les conditions écologiques locales sont caractérisées par une altitude de 500 m, une exposition au Sud-Est et une pluviométrie de 1200 mm par an. Le sol est un sol de type brun acide lessivé de texture sablo-argileuse très filtrant.

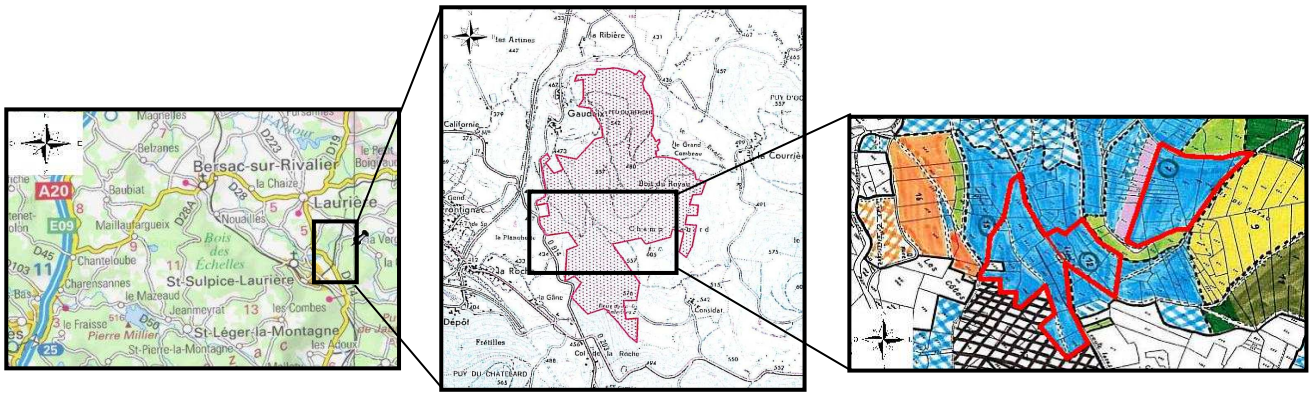


Figure 19. – Localisation du site de démonstration.

3.1.2. Gestion historique

L'itinéraire technique suivi par le propriétaire jusqu'à aujourd'hui est décrit dans le tableau 9 ci-dessous.

Année d'intervention	Type d'intervention	Détails techniques	Nombre de tiges après opération	Emissions de chaque opération (tC/ha)
1979	Dessouchage, andainage et préparation du sol	Andains espacés de 30m	0	
1980	plantation Douglas	Densité de 1320 tiges/ha. Fertilisation par apport d'environ 50g de phosphate d'amoniaque	1320	1,03 (1)
1980, 1981, 1982 et 1983	Dégagement des plantations	dégagement manuel	1320	0
1997	1ère éclaircie	Eclaircie systématique d'intensité de 20% et éclaircie sélective d'intensité 30%	740	0,105 (2)
1997	Elagage manuel	Elagage à 6m de 200 tiges/ha	740	0
2007	2é éclaircie	Eclaircie sélective d'intensité 30%	518	0,11 (2)

(1) Calcul réalisé à partir des données issues de la thèse d'Anne Prieur (2) Calcul réalisé à partir des rendements des machines

Tableau 9. - Itinéraire technique du site n°7.

Aucun inventaire n'ayant été mis en place par le passé, il est difficile de reconstituer précisément l'évolution des stocks de carbone.

3.1.3. Estimation des stocks actuels

Afin d'estimer les stocks de carbone en place, un inventaire est réalisé sur le site, selon la méthode décrite en annexe 1 : dix placettes permanentes ont été installées. Sur chacune des placettes, les stocks de carbone des Douglas, des feuillus divers et du bois mort sur pied et au sol ont été quantifiés.

Les résultats sont présentés dans le diagramme de la figure 20 et font état d'un stock de carbone de **127,1 tC/ha +/- 25,4 tC/ha** (hors carbone du sol).

À partir des données de Nys *et al.* (2008), les stocks de carbone de l'humus et du sol peuvent être respectivement estimés à **9,7 +/- 3,6 tC/ha** et à **129,5 +/- 35,5 tC/ha**. On notera que les stocks du sol sont alors plus élevés que les stocks de la biomasse.

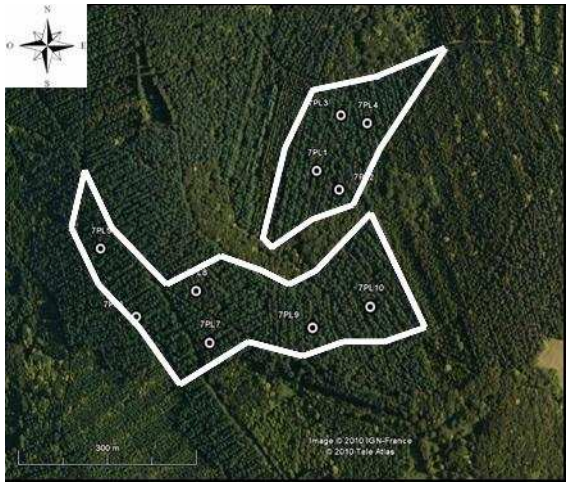


Figure 19. – Plan d'échantillonnage du site n°7.

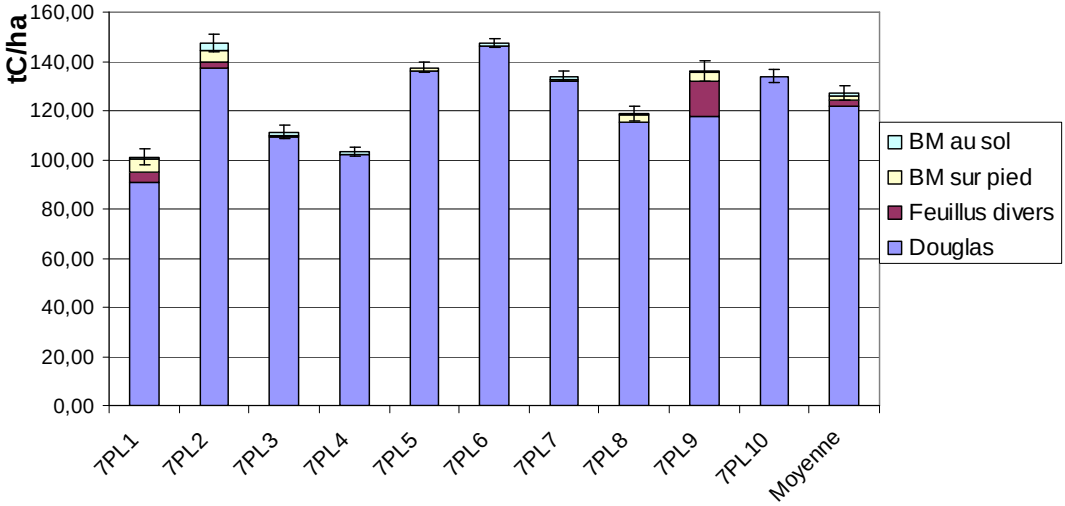


Figure 20. - Estimation des stocks de carbone « biomasse » pour le site n°7.

3.1.4. Modélisation de différents scénarios sylvicoles

3.1.4.1. Contexte

Le Douglas constitue l'une des ressources forestières importantes de la forêt limousine. Cette essence y compte pour 10 % de la surface et pour 18 % de l'accroissement en volume (source : IFN). Au niveau national, le Douglas représente **une ressource importante et en forte croissance**, essentiellement située dans le « grand massif central » et en forêt privée. Issus pour la plupart de reboisements d'après-guerre, les peuplements de Douglas arrivent en ce moment à maturité. Le débat – parfois polémique – concernant l'âge d'exploitabilité optimal des Douglas est une preuve de l'enjeu que représente cette ressource. Les uns prônent une exploitation aux alentours de 45 ans qui limite les risques et répond à la demande du marché. D'autres se basent au contraire sur le fait qu'une récolte plus tardive permet de maximiser la proportion de bois de qualité. Les deux parties revendiquent par ailleurs un revenu optimisé (CETEF Mayenne, 2007 ; Poncelet, 2008).

En ne prenant en compte que les stocks de carbone en forêt et dans les produits bois, un allongement de révolution entraine un stockage de carbone supplémentaire (Lecocq, 2008 ; Vallet,

2005). Premièrement, on repousse la coupe, laquelle supprime le stock de carbone forestier : un stock temporaire est ainsi créé. Deuxièmement, d'avantage de bois d'œuvre de qualité ayant une durée de vie longue est produit : le stock « produit bois » est ainsi augmenté. **On compare donc ici un itinéraire de production de Douglas en 45 ans, classiquement pratiqué dans la région avec un itinéraire de 55 ans.**

3.1.4.2. Hypothèses de quantification

- **Croissance des peuplements**

Pour prévoir les quantités de carbone séquestrées selon différentes sylvicultures, il est nécessaire de pouvoir prédire la croissance des arbres en fonction des scénarios de gestion détaillés sous forme d'itinéraires techniques. Il existe pour cela des tables de production, formées de manière empirique, qui fournissent des données dendrométriques aux différents âges des peuplements pour une classe de productivité donnée.

Les tables anglaises établies en 1976 par la Forestry Commission traduisent une sylviculture plus dynamique que celles de Décourt (1967) et sont donc plus adaptées à la gestion actuelle des peuplements de Douglas en France. Elles sont établies pour l'Angleterre : le site se trouve par conséquent en dehors de leur aire d'application. Toutefois, le Limousin étant en limite du domaine atlantique, les tables anglaises y sont couramment utilisées. La classe de fertilité 24 correspondant à une hauteur dominante de 25-26 m vers 30 ans (observée sur le site) et l'itinéraire *Crown Thinning* sont sélectionnés.

Il est à noter que des simulateurs de croissance existent pour les futaies régulières de Douglas (Simcop développé par l'INRA ou Oasis développé par le FCBA) mais qu'ils n'ont pas pu être utilisés dans le cadre de cette étude car les organismes d'accueil du stage n'ont pas pu les acquérir.

- **Itinéraires techniques retenus**

(i) Révolutions de 45 ans

Ce premier scénario correspond à celui d'une production de Douglas en 45 ans sans élagage. Les hypothèses de valorisation du bois ainsi que l'itinéraire technique reprenant les interventions proposées par les tables de production anglaises sont décrits dans le tableau 10.

âge (ans)	H (m)	Avant coupe			Après coupe			Répartition des produits (%)		
		N (tiges/ha)	G (m²/ha)	C forêt (t/ha)	N (tiges/ha)	G (m²/ha)	C forêt (t/ha)	Structure	Emballage lourd	Papier
16	13,4	2960	38	88	1165	17	41	-	20	80
21	17,9	1165	30	82	662	20	55	-	30	70
26	22,1	662	34	98	436	25	74	10	20	70
31	25,7	436	38	116	322	30	96	20	40	40
36	28,7	323	41	137	257	34	119	40	50	10
41	31,2	257	42	157	212	37	138	50	40	10
45	33,3	212	44	172	0	0	0	70	20	10

Tableau 10. – Itinéraire technique correspondant à des révolutions de 45 ans.

(ii) Révolutions de 55 ans

Ce scénario est identique au précédent, excepté le fait que les arbres sont laissés sur pied 10 ans de plus. Conformément aux tables de production anglaises, deux éclaircies sont pratiquées à 46 et 51 ans.

âge (ans)	H (m)	Avant coupe			Après coupe			Répartition des produits		
		N (tiges/ha)	G (m²/ha)	C forêt (t/ha)	N (tiges/ha)	G (m²/ha)	C forêt (t/ha)	Structure	Emballage lourd	Papier
avant 46 ans	Voir itinéraire de référence									
46	33,5	212	44	172	183	39	156	70	20	10
51	34,6	183	45	185	164	42	172	70	20	10
55	36,6	164	46	195	-	-	-	70	20	10

Tableau 11. – Itinéraire technique correspondant à des révolutions de 55 ans.

3.1.4.3. Bilan carbone de chacun des scénarios

En partant de l'âge et des stocks du peuplement en place, l'évolution des stocks de carbone est « modélisée » et présentée dans les graphiques ci-dessous pour chacune des durées de révolution testées (voir figures 21 et 22). Les émissions évitées par effet de substitution se cumulent au cours du temps et sont donc présentées sur un graphique à part. La modélisation est effectuée sur 100 ans en reproduisant l'itinéraire technique autant de fois que nécessaire.

(i) Révolutions de 45 ans

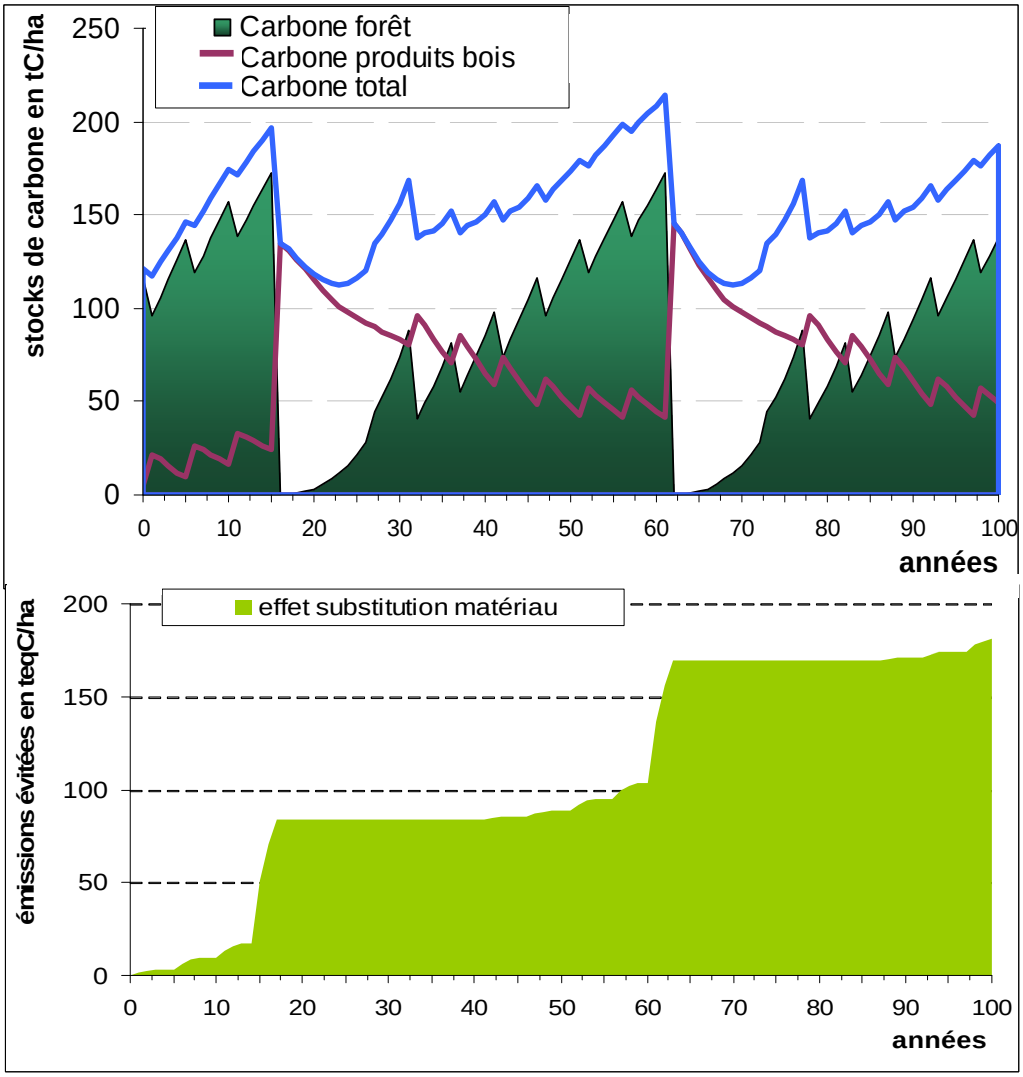


Figure 21. – Bilan carbone du scénario « révolutions de 45 ans ».

Le stock de carbone moyen en forêt constaté sur une révolution est de **78,5 tC/ha**, contre **154,6 tC/ha** pour le stock total incluant les produits bois. On constate que le stock dans les produits bois est loin d'être négligeable (49 % du stock total). Ce stock important est lié à l'hypothèse d'utilisation d'une part importante du bois de Douglas en structure, produit ayant une durée de vie très longue.

Les émissions évitées par effet de substitution se chiffrent à 85,6 tC/ha en 45 ans, soit **1,90 tC/ha/an**. Le débouché bois énergie n'a pas été considéré comme étant un débouché potentiel : la substitution énergétique est donc nulle.

(ii) Révolutions de 55 ans

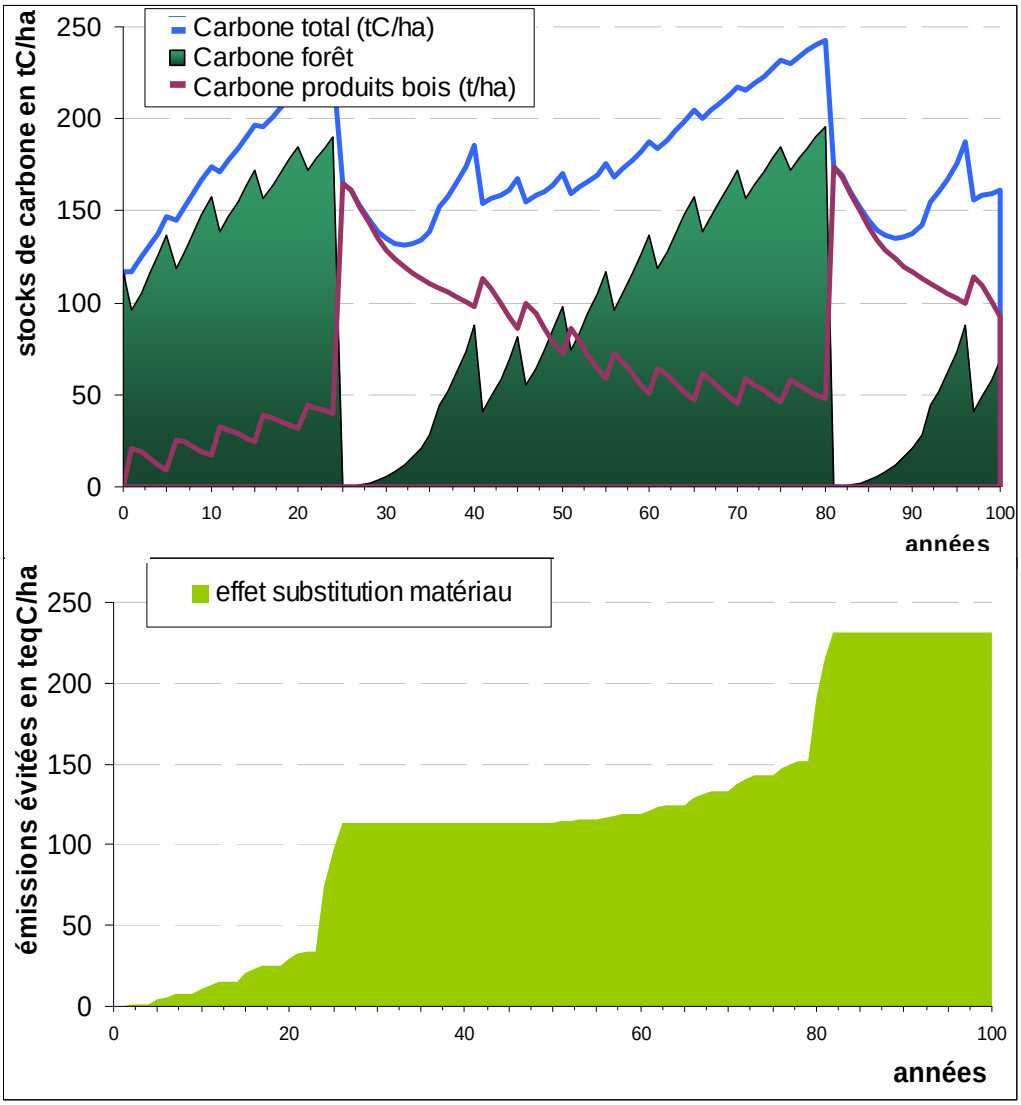


Figure 22. – Bilan carbone du scénario « révolutions de 55 ans ».

De façon logique, le stock moyen en forêt constaté sur une révolution est supérieur à celui constaté pour une révolution de 45 ans. Il est de **96,2 tC/ha**, contre **179,3 tC/ha** pour le stock total incluant les produits bois. Les émissions évitées par effet de substitution se chiffrent à 117,7 tC/ha en 55 ans, soit **2,14 tC/ha/an**.

En allongeant les révolutions de 10 ans, le stock est donc augmenté de **17,7 tC/ha** en moyenne pour la biomasse forestière et de **24,7 tC/ha** en moyenne pour les stocks en forêt et dans les produits bois. Les émissions évitées par effet de substitution sont de **0,24 tC/ha/an.**

3.1.4.4. Stockage supplémentaire lors d'un allongement des révolutions de 10 ans

Le changement d'itinéraire sylvicole en passant de 45 à 55 ans entraine un stockage supplémentaire moyen de **17,7 tC/ha** pour la biomasse forestière et de **24,7 tC/ha** pour les stocks en forêt et dans les produits bois. L'augmentation de l'effet de substitution est très faible puisqu'elle n'est que de **0,24 tC/ha/an.** Compte tenu des limites de la méthode de quantification des effets de substitution évoquées précédemment, cet effet additionnel peut être considéré comme négligeable.

L'accroissement du stock de carbone en forêt et dans les produits bois décrit ci-dessus doit être considéré au regard de l'augmentation des risques provoquée par un itinéraire laissant les arbres plus longtemps sur pied. Étant donné le faible risque d'incendie en Limousin, ce dernier peut-être écarté. D'une manière générale, le Douglas est peu affecté par les maladies, et les insectes qui l'attaquent interviennent la plupart du temps dans sa phase juvénile : **on peut considérer que le Douglas a – pour le moment – peu d'ennemis en France** (De Champs, 1997). Pour cette raison, les risques sanitaires seront considérés comme négligeables et ne seront pas pris en compte.

Le Douglas est un arbre qui résiste plutôt bien au vent dans sa phase adulte. Néanmoins, il peut être sujet aux chablis lors des fortes tempêtes et il a été démontré que ce risque augmentait avec la hauteur (Colin *et al.*, 2009). Alors que des études fournissent des facteurs d'augmentation des dégâts selon différentes hauteurs des peuplements, la connaissance de l'aléa vent (temps de retour des tempêtes selon leur intensité) reste très partielle et sujette à discussion (Colin *et al.*, 2009). Il est donc **difficile de quantifier le risque supplémentaire** induit par un allongement des révolutions.

Les risques liés aux changements climatiques (risques sanitaires, de sécheresse, d'incendie) doivent aujourd'hui être considérés. De nombreux gestionnaires tendent à réduire les cycles de production pour ces raisons. Toutefois, de même que pour les tempêtes, la quantification de ces risques est aujourd'hui difficile. Les résultats de travaux concernant la vulnérabilité des forêts face aux risques climatiques devraient voir le jour et permettre la prise en compte de tels risques.

L'augmentation des stocks de carbone par allongement des révolutions est donc significative, mais n'est valable que si l'augmentation du facteur risque est pris en compte. Un bilan économique d'un projet carbone d'allongement des révolutions est proposé dans la partie 4.2. Les risques sont alors pris en compte.

3.2. Site du Val d'Oise : taillis de châtaignier

3.2.1. Description du site

Ce site, d'une surface de 10 ha est inclus dans une copropriété d'une trentaine d'hectares située sur la commune de Villers-en-Arthies dans le Val d'Oise (95). Il s'agit d'une parcelle de taillis de châtaignier. Situé dans une forêt de plaine, le site se caractérise par une pluviométrie moyenne annuelle de 630 mm et un sol de bonne fertilité.

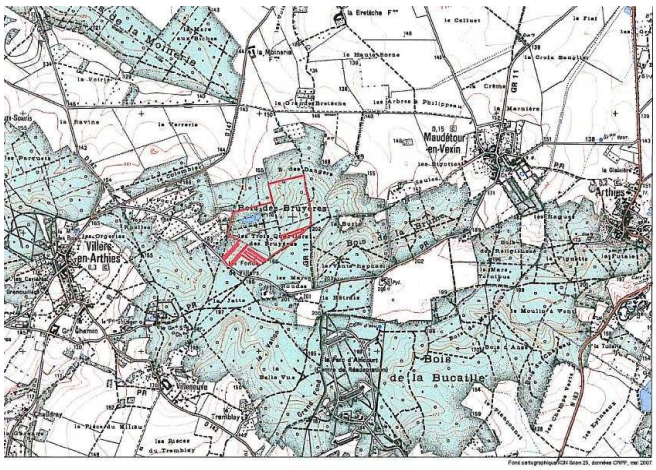


Figure 23. – Plan de situation du site pilote 11.

Figure 24. – Site pilote 11. Photo Simon Martel.

3.2.2. Estimation des stocks actuels

Une coupe ayant été réalisée en 2005, le peuplement est en train de se régénérer et les stocks de carbone se reconstituent progressivement grâce aux rejets de souche. Un inventaire a été réalisé sur

le site, montrant que le stock de carbone dans les arbres et le bois mort au sol est actuellement de **18,7 tC/ha +/- 4,7 tC/ha.**

3.2.3. Hypothèses de quantification : modélisation de la croissance

Bien qu'étant la troisième essence feuillue française en termes de surface, aucun modèle de croissance à sylviculture variable n'existe pour le châtaignier. Par chance, **des tables de production à validité nationale** ont récemment vu le jour : ce sont les résultats des travaux du **groupe de travail « châtaignier » de l'IDF** animé par Jean Lemaire et publiés en 2008. Un modèle de croissance empirique des taillis a été élaboré à partir du traitement de nombreuses données récoltées en région, donnant aux courbes de fertilité une portée nationale. C'est donc ce modèle qui a été utilisé pour estimer la croissance des taillis de châtaignier.

3.2.4. Description de la gestion historique et de l'itinéraire de référence

Acquis dans les années 80 par les propriétaires actuels alors que le peuplement était un taillis très jeune, ces derniers n'y ont pas pratiqué d'opération sylvicole. Une coupe rase a été pratiquée en 2005. L'itinéraire historiquement pratiqué par les propriétaires est donc la conduite en **taillis simple** : on pratique une coupe rase tous les 30 à 40 ans environ et on laisse les arbres repousser sur les souches sans intervention pendant la révolution suivante. On récolte quelques billes qui pourront être utilisées pour partie en sciage (usage parquet ou menuiserie). Toutefois, sans opération sylvicole en amont, peu de tiges sont de qualité (le risque de roulure est plus important) et la part de bois valorisée en bois d'œuvre reste donc faible.

Les données de croissance de cet itinéraire correspondent à l'itinéraire témoin sans éclaircie de Lemaire (2008) pour la **classe de fertilité 2** (classe de fertilité mesurée sur le site).

Cet itinéraire est réitéré plusieurs fois. Néanmoins, la production de ce taillis va nécessairement diminuer après chaque coupe en raison de l'**épuisement des souches**. Aucune étude ne fournit de données chiffrées sur ce phénomène (Bourgeois *et al.*, 2004) et par conséquent cette diminution de production est difficilement quantifiable. S'agissant de l'itinéraire de référence, la diminution de la production n'est pas prise en compte de manière conservatrice : la différence entre la séquestration de l'itinéraire alternatif et de l'itinéraire de base sera sous-estimée.

Le tableau 12 présente l'itinéraire technique et la répartition des produits.

âge (ans)	opération	Avant coupe			Après coupe			répartition des produits					
		N (tiges /ha)	G (m²/ha)	C forêt (t/ha)	N (tiges /ha)	G (m²/ha)	C forêt (t/ha)	structure	parquet lambris	menuiserie	trituration pour panneaux	piquet	bois de feu/bois energie
30	coupe rase	1043	34	106	-	-	-	-	25%	5%	30%	20%	20%

Tableau 12. Itinéraire technique du scénario de référence.

3.2.5. Premier itinéraire alternatif : amélioration du taillis pour la production de bois d'œuvre.

L'itinéraire alternatif considéré consiste à pratiquer des interventions sylvicoles relativement tôt et de façon régulière dans le peuplement afin de **produire du bois d'œuvre**. Ce scénario correspond à l'itinéraire « **petites grumes et grumes** » proposé par Bourgeois *et al.* (2004) pour lequel Lemaire (2008) a élaboré une table de production.

Si l'on veut réitérer cet itinéraire plusieurs fois, la question de la régénération se pose : une régénération par semis après la coupe définitive permettrait de s'affranchir du problème de l'affaiblissement des coupes (et probablement de former des arbres de qualité supérieure). Des travaux seront alors nécessaires lors des premières années suivant la coupe afin de lutter contre les rejets de souche.

âge (ans)	opération	Avant éclaircie			Après éclaircie			répartition des produits					
		N (tiges /ha)	G (m²/ha)	C forêt (t/ha)	N (tiges /ha)	G (m²/ha)	C forêt (t/ha)	structure	parquet lambris	menuiserie	trituration pour panneaux	piquet	bois de feu/bois energie
10	dépressage	4040	23	38	600	5	9						
16	éclaircie en faveur des tiges désignées	600	15	35	300	8	18					50%	50%
25	éclaircie en faveur des tiges désignées	300	18	55	180	11	34		45%	20%	35%		
45	coupe de bois d'œuvre	180	25	110	-	-	-	10%	55%	20%	15%		
46-49	Travaux pour favoriser les semis												

Tableau 13. – Itinéraire technique du premier scénario alternatif.

3.2.6. Second itinéraire alternatif : amélioration du taillis pour la production de bois d'œuvre et irrégularisation

Une variante du premier itinéraire alternatif est également proposée. Elle consiste à suivre dans un premier temps cet itinéraire dynamique, mais en prélevant les gros bois de façon plus espacée dans le temps entre 35 et 55 ans. Le risque de roulure sur ces bois est augmenté par l'allongement des rotations et par les à-coups dans la sylviculture. Néanmoins, l'enlèvement progressif des gros bois permet la régénération du peuplement.

De même que pour l'itinéraire décrit précédemment, le mode de régénération pose question. La régénération naturelle est à privilégier, mais elle nécessite des travaux sylvicoles. Pour tenir compte du risque de roulure, 25 % des tiges prélevées entre 45 et 60 ans sont considérées comme dévalorisées et donc destinées à la trituration. **On estime qu'à 60 ans le peuplement a atteint une structure irrégulière**. L'accroissement sur le volume « bois fort » des gros bois est fixé à 6 m^3/ha/an : le peuplement est alors maintenu dans cet état d'équilibre par des prélèvements de 65 m^3 tous les 8 ans (avec une surface terrière variant de 16 à 21 m²/ha).

Age (ans)	Opération	Avant éclaircie		Après éclaircie		Répartition des produits					
		G (m²/ha)	C forêt (t/ha)	G (m²/ha)	C forêt (t/ha)	structure	parquet lambris	menuiserie	trituration pour panneaux	piquet	bois de feu/bois energie
10	dépressage	23	38	5	9						
16	éclaircie en faveur des tiges désignées	15	35	8	18					50%	50%
25	éclaircie en faveur des tiges désignées	18	55	11	34		45%	20%	35%		
35	coupe de bois d'œuvre	19	73	11	41	10%	55%	20%	15%		
40	coupe de bois d'œuvre	20	59	16	42	10%	30%	20%	40%		
45	coupe de bois d'œuvre	23	74	19	44	10%	30%	20%	40%		
51	coupe irrégulière	25	79	20	51	10%	30%	20%	40%		
56	coupe irrégulière	21	72	16	51	10%	55%	20%	15%		
61	coupe irrégulière	21	74	16	52	10%	55%	20%	15%		

Tableau 14. – Itinéraire technique du second scénario alternatif

Il est important de signaler que l'**on manque de recul concernant la gestion du châtaignier en irrégulier**. La modélisation de la croissance des feuillus en futaie irrégulière est par ailleurs peu développée. Les peuplements irréguliers de châtaignier sont rares : les seuls exemples recensés sont les essais du CRPF Bretagne et le site de l'association futaie irrégulière (AFI) en Picardie (Pichard et Lemaire, com. pers.). Même si le scénario présenté ici se base sur les enseignements tirés de la gestion de ces peuplements, il reste très théorique et devra être adapté au contexte.

3.2.7. Bilan carbone de chacun des scénarios

Les graphiques 25, 26 et 27 permettent de visualiser l'évolution des stocks de carbone en forêt, dans les produits bois, ainsi que les émissions évitées par effet de substitution pour les trois itinéraires simulés.

3.2.7.1. Itinéraire de référence

Le stock moyen en forêt pour une révolution est de **52 tC/ha.** Le stock total (incluant les produits bois) est lui de **70 tC/ha** (les produits bois représentent 25 % du stock). L'effet de substitution permet d'éviter des émissions de GES à hauteur de **29 teqC/ha** par révolution, soit **0,97 tC/ha/an**. L'effet substitution énergétique compte pour 36 % de ces économies d'émission. L'effet de substitution cumulé est de **88 teqC /ha** au bout de 100 ans.

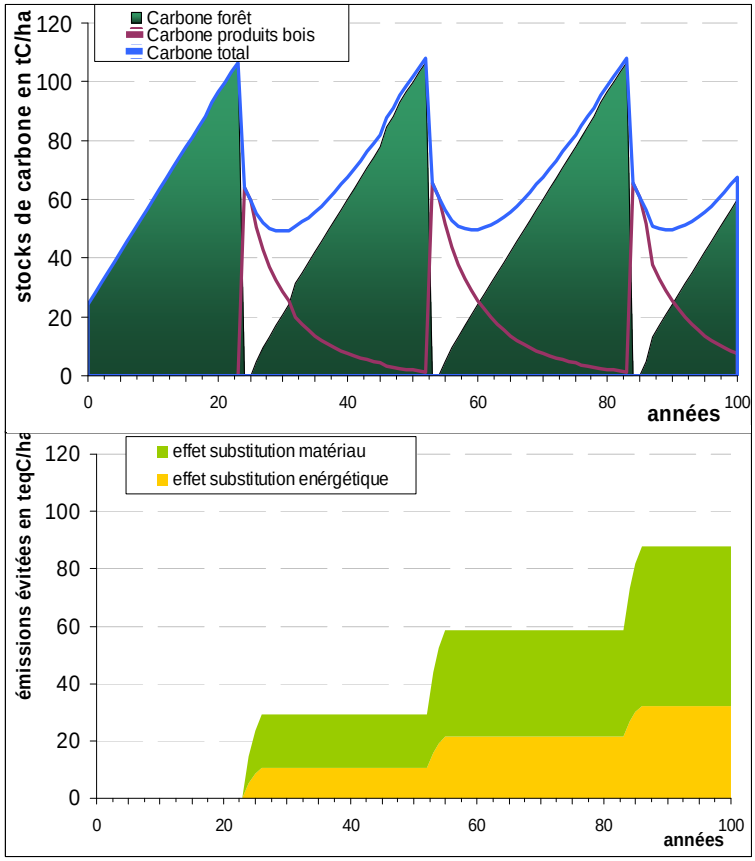


Figure 25. – Simulation de l'itinéraire « taillis simple ».

3.2.7.2. Premier itinéraire alternatif

Le stock moyen en forêt pour une révolution est de **45 tC/ha.** Le stock total (incluant les produits bois) est lui de **75 tC/ha** (les produits bois représentent 40 % du stock). L'effet de substitution permet d'éviter des émissions de GES à hauteur de **69 teqC/ha** pour un cycle de production, soit **1,45 tC/ha/an**. L'effet substitution énergétique compte alors pour 16 % de ces économies d'émission. L'effet de substitution cumulé est de **144 teqC/ha** au bout de 100 ans**.**

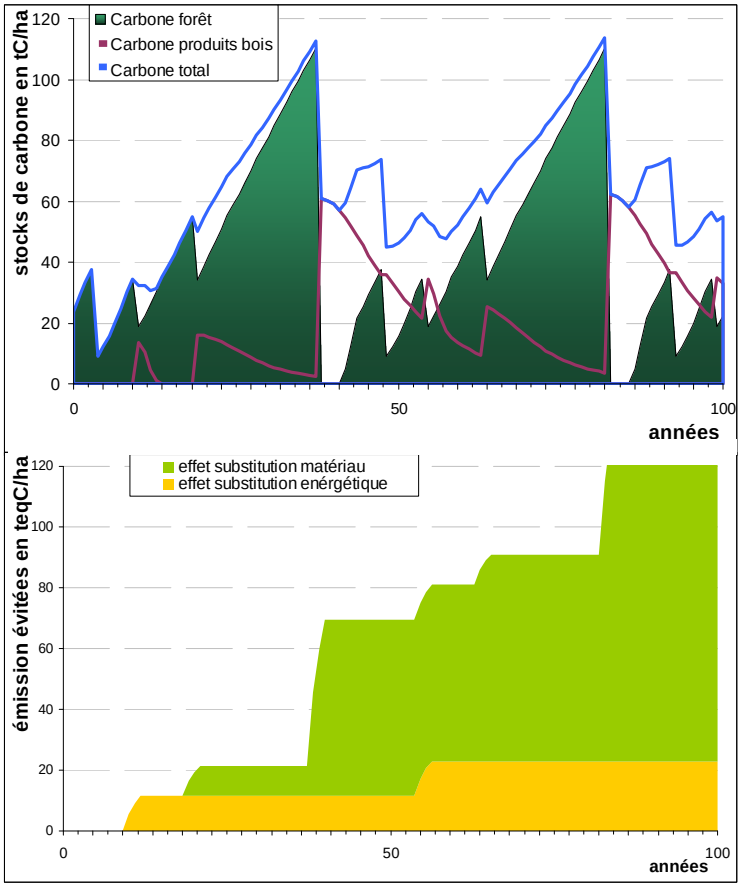


Figure 26. – Simulation du premier itinéraire alternatif .

3.2.7.3. Second itinéraire alternatif

Dans le cas de cet itinéraire irrégulier, se pose **la question du pas de temps choisi pour la comparaison avec d'autres itinéraires**. L'utilisation d'une valeur moyenne donnée lorsque l'équilibre est atteint ne tient en effet pas compte de la phase de transition nécessaire. Les chiffres seront donc donnés pour deux pas de temps : « à l'équilibre » ainsi que pour une période de 100 ans, incluant la phase de transition.

Le stock moyen en forêt à l'équilibre est de **63 tC/ha**, contre **54 tC/ha** sur 100 ans. Le stock total (incluant les produits bois) est lui de **81 tC/ha** à l'équilibre et de **73 tC/ha** pour une période de 100 ans. L'effet de substitution cumulé est de **110 teqC/ha** au bout de 100 ans**.**

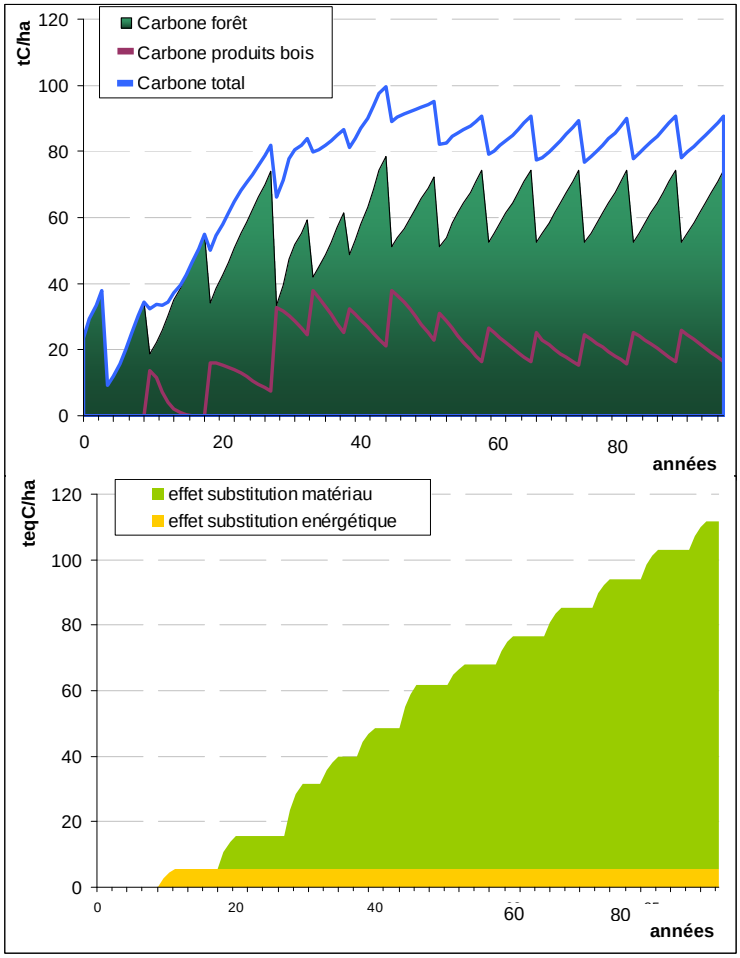


Figure 27. – Simulation du second itinéraire alternatif.

3.2.8. Comparaison des différents scénarios

Le passage de l'itinéraire de référence au premier itinéraire alternatif entraine **un gain de 5 tC/ha en moyenne sur la révolution.** Compte tenu des imprécisions d'estimation inhérentes à la méthode de quantification, on peut considérer que **ces deux itinéraires conduisent globalement à des stocks de carbone équivalents** : dans l'itinéraire alternatif, les pertes du stock en forêt dues aux éclaircies sont compensées par la production de plus grandes quantités de bois d'œuvre à longue durée de vie. Si on prend en compte l'**effet de substitution**, **le changement de sylviculture est par contre bien plus intéressant** au niveau du bilan : il permet d'éviter l'émission de **56 teqC/ha**, soit environ **200 teqCO_2/ha** en 100 ans. Toutes les limites inhérentes à la méthode de quantification doivent cependant être prises en considération, d'autant plus qu'il s'agit majoritairement de substitution matériau.

Comparé à un itinéraire de référence avec de plus courtes rotations, l'itinéraire alternatif peut permettre de stocker significativement plus de carbone (sans prendre en compte l'effet de substitution). C'est ce qui a été étudié en se plaçant dans le cas du micro projet de conversion de taillis du CRPF Rhône-Alpes. L'itinéraire de référence est un taillis de châtaignier d'une durée de révolution moyenne de 20 ans avec une valorisation des bois essentiellement en piquet. Le stock moyen en forêt et dans les produits bois est alors de **41,7 tC/ha**. Ce projet est situé sur une station de la même classe de fertilité que le site pilote du Val d'Oise étudié ici. Le stock moyen est donc le même pour le premier itinéraire alternatif, soit **75 tC/ha.** Dans ce cas, le changement de sylviculture entraine une séquestration additionnelle moyenne de **33 tC/ha**, qui est significative.

4. Vers une valorisation économique de la séquestration du carbone par la forêt française ?

Les exemples de la partie précédente montrent qu'une gestion sylvicole améliorée permet d'augmenter de façon significative la séquestration de carbone en forêt et dans les produits bois. Nous avons vu dans la partie 1.2.1. qu'il n'était pas possible aujourd'hui de mettre en place des projets carbone au sein des marchés réglementaires du protocole de Kyoto et que les forestiers se tournent donc vers les marchés volontaires. Nous allons donc aborder dans cette partie **les conditions d'accès à ces marchés volontaires.**

4.1. La standardisation des projets volontaires

La crédibilité du marché volontaire a dernièrement été sérieusement remise en cause lorsque la presse a révélé l'existence de faux projets de compensation (exemple : Financial Times, 2007). L'additionnalité de certains projets a également été remise en cause (Schneider, 2007). Pour remédier à cela, des labels de qualité ont récemment été mis en place. Leur objectif est de garantir l'intégrité environnementale des projets qu'ils certifient afin de rassurer les acheteurs de crédits concernant la réalité de la compensation. Parmi ces standards qui ont récemment vu le jour, le Volontary carbon standard (**VCS**), le Carbon fix standard (**CFS**) et le Chicago climate exchange (**CCX**) sont les plus importants et certifient les crédits issus des projets qu'ils ont validés. D'autres types de standards tels que Climate, community & biodiversity standard (**CCBS**) et **Plan vivo** certifient des projets, mais pas les crédits qui en sont issus. Ces deux derniers labels incluent une forte composante liée à la préservation de la biodiversité et au développent des communautés locales.

Des études ont permis de comparer les labels suivant le type et la taille des projets forestiers (Foley, 2009 ; Guigon *et al.*, 2009 ; Jullian *et al.*, 2009). Le tableau 15 résume les principales caractéristiques de ces standards.

Standards	**Voluntary Carbon Standard**	**Chicago Climate Exchange**	**Carbon Fix Standard**
Types de projets forestiers acceptés	Boisement/déforestation évitée Nouvelle gestion sylvicole Séquestration dans les produits bois	Boisement/déforestation évitée Nouvelle gestion sylvicole Séquestration dans les produits bois	Boisement
Permanence	Assurance avec mise en réserve d'une partie des crédits (entre 5 et 60 % selon l'analyse de risque préalable)	Assurance avec mise en réserve de 20 % des crédits	Assurance avec mise en réserve de 30 % des crédits pour tous les projets
Nature et méthode de calcul des crédits	Crédits ex-post : délivré après vérification de la séquestration en forêt	Crédits ex-post : délivré après vérification de la séquestration en forêt	ex ante (vente par anticipation) et ex post
Particularité du standard	La permanence est assurée par une mise en réserve dans un "buffer" d'un partie des crédits (entre 5 et 60% selon une analyse de risque)	Les projets dans les pays de l'annexe 1 ne sont pas acceptés	Les projets certifiés par le CCBS et le Forest Stewardship Council sont acceptés d'office
Durée minimale du projet	20 ans		30 ans

Tableau 15. – Comparaison des principaux standards des marchés volontaires.

Il ressort de cette comparaison que **seul le label VCS permettrait la certification de crédits carbone issus de projets de gestion forestière améliorée en France**. Ce standard tend d'ailleurs à s'imposer comme le label de référence sur le marché volontaire (forestier ou non) : 35 % des crédits standardisés échangés sur les marchés volontaires en 2009 étaient certifiés par le VCS (Hamilton *et al.*, 2010a). Seul le standard VCS sera donc par la suite considéré pour la certification de projets volontaires de gestion forestière améliorée en France.

Concernant le double compte, il faudra démontrer que les crédits émis dans le cadre d'un projet ne font pas partie des 3,2 $MtCO_2$ crédités à l'État français au titre de l'article 3.4. du protocole de Kyoto. La barrière du double compte semble cependant plus facilement surmontable pour des projets de gestion forestière améliorée que pour des projets de boisement (Deheza et Bellassen, 2010). Suites aux nombreuses demandes des différentes organisations forestières, des indices laissent présager que le ministère de l'Écologie français serait prêt à fournir une lettre attestant la non-comptabilisation au titre de l'article 3.4. Un tel document suffirait alors à démontrer le non double compte aux yeux du VCS.

4.2. La méthodologie, élément central pour bâtir des projets standardisés

4.2.1. Place de la méthodologie dans le référentiel VCS

Au sein du MDP, **les** méthodologies jouent un rôle central de cadrage, permettant d'assurer la conformité de chaque type de projet avec les principes de base du mécanisme comme l'additionnalité. Le cycle des projets VCS s'inspire fortement de celui du MDP et les méthodologies y ont donc également un rôle crucial. Pour chaque projet, après éventuellement dépôt d'une note d'idée de projet (NIP en français), obligatoire dans la procédure CDM et facultative dans la procédure VCS, un document descriptif de projet (DDP) doit être élaboré. Ce DDP doit être établi suivant un formalisme bien défini sur la base d'une méthodologie qui donne les directives à respecter. Dans le cadre du VCS, les méthodologies pouvant être utilisées sont celles du MDP, celles du Climate action reserve[1] et celles approuvées par le bureau du VCS. De nouvelles méthodologies peuvent être proposées par des organismes porteurs de projet au bureau du VCS. Une fois validées par le mécanisme de la double approbation, la méthodologie est rendue publique et n'importe quel porteur de projet peut s'y référer.

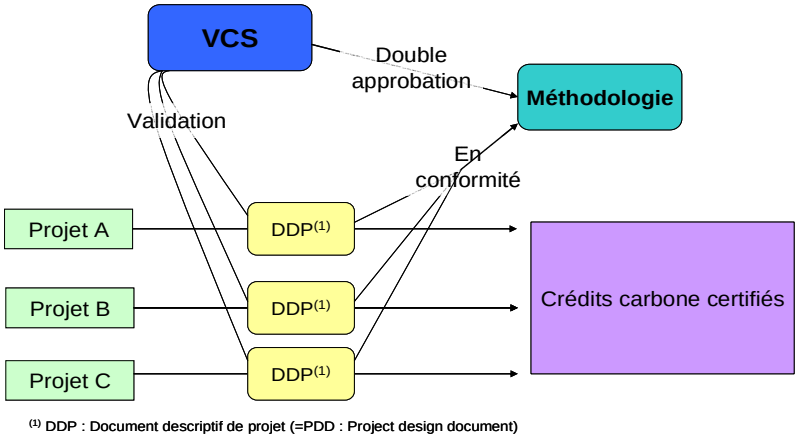


Figure 28. – Processus de certification de projets par le VCS.

S'appuyant sur les consignes générales données par le standard (VCS, 2008a et VCS, 2008b), ainsi que sur des éléments du MDP, la méthodologie donne des outils et des règles à suivre concernant :

- l'éligibilité du projet
- la démonstration de l'additionnalité du projet

[1] Le climate action reserve (CAR) est un standard volontaire propre à la Californie.

– l'estimation ex-ante du bénéfice carbone du projet
– la prise en compte des risques de non permanence et de fuite
– la vérification ex-post et le suivi du projet

4.2.2. Vers la construction d'une méthodologie pour des projets de gestion forestière améliorée en France

La méthodologie est un élément indispensable pour la mise en place de projet carbone. Des méthodologies de gestion forestière améliorée sont en cours de validation par le VCS. Une méthodologie d'allongement des révolutions a dernièrement été validée (VCS, 2010). Toutefois, aucune méthodologie ne semble correspondre aux projets que les forestiers français voudraient mettre en place. La société forestière de la caisse des dépôts et consignation souhaiterait valoriser le carbone forestier et travaille donc sur la mise au point d'une méthodologie par l'intermédiaire d'une stagiaire, Florianne François. Ce stage a aussi été l'occasion de participer aux prémices de l'élaboration de cette méthodologie afin que des projets de la forêt privée puissent s'y référer. **Ce paragraphe présente les orientations prises ainsi que les points de blocage à lever pour que cette méthodologie puisse voir le jour.** La méthode d'inventaire forestier proposée en annexe 1 devrait ainsi enrichir la partie *monitoring* de cette méthodologie.

Une méthodologie VCS peut être générale et cibler différents types de projet au sein de la même catégorie. Par exemple une même méthodologie *improved forest management* (IFM) peut rassembler des projets ERA et LtPF. C'est le but à atteindre ici : la méthodologie permettrait de couvrir des projets d'allongement des révolutions (ERA), de substitution d'essences ou de conversion de taillis (LtPF). De façon générale, la méthodologie peut donner des directives à suivre plus ou moins précises. Plus elle est généraliste, plus le nombre de projets qui pourront s'y référer sera grand. À l'inverse, si elle est précise, les porteurs de projet qui rédigent un DDP seront beaucoup mieux guidés dans leur démarche.

Les flux et stocks de carbone doivent être estimés à partir de modèles. La diversité et la complexité de la plupart des forêts françaises (en opposition par exemple à des plantations monospécifiques) peuvent rendre l'utilisation d'un modèle délicate. **La profession est en attente de modèles de croissance validés par la communauté scientifique.** Toutefois, des modèles de croissance génériques ou encore des tables de production semblent convenir dans les méthodologies VCS, comme l'indique la validation de la méthodologie ERA (VCS, 2010). L'utilisation de tels outils sera donc conseillée dans un premier temps.

Dans la plupart des méthodologie validées ou en cours de validation, la prise en compte du compartiment « produits bois » se fait grâce aux moyennes d'utilisation du bois du département de l'énergie américain (Winjum at al., 1998 ; méthode 1605b). Si de telles méthodes sont utilisées, il faudra traduire ces coefficients à notre cas français. Des données concernant la fraction de bois restant après cent ans d'utilisation des produits seront nécessaires. D'autres méthodes d'estimation du stockage dans les produits bois pourront également être envisagées. Celle qui est proposée dans la partie 2 de cette étude semble complexe à mettre en œuvre.

La question du *monitoring* est également cruciale : l'utilisation des données de l'inventaire forestier national (IFN) ne sera probablement pas valable statistiquement pour les projets qui seront de trop petite surface. Suivant la taille du projet et sa répartition géographique, des méthodes de *monitoring* par utilisation des données de l'IFN ou par inventaire de terrain pourront être proposées.

L'élaboration d'une méthodologie nécessite un important travail : il faut ajuster les directives pour qu'elles soient cohérentes avec les préconisations du standard tout en restant réalistes pour être réalisables à moindre coût. Ainsi le coût d'élaboration d'une méthodologie est important, tout comme l'ensemble des coûts de standardisation. Un bilan économique est donc nécessaire afin de les comparer aux revenus supplémentaires issus de la vente des crédits carbone.

4.3. Bilan économique appliqué à un cas d'étude

4.3.1. Description du projet carbone potentiel

Un **projet carbone fictif** d'allongement des révolutions est imaginé. On suppose qu'il s'applique à une forêt de Douglas située sur des stations de bonne fertilité, équivalentes à celles du site de démonstration France forêt n° 7. Les éléments de quantification du carbone sont donc issus de la partie 3.1.

- ***Baseline***

La *baseline* peut-être établie de différentes manières : elle peut être bâtie selon des références historiques, selon les pratiques communes (*business-as-usual*), selon des critères économiques… Le scénario de référence choisi sera celui d'une production de Douglas en 45 ans sans élagage, décrit dans le paragraphe 3.1.4.2.

Le choix d'un tel scénario de base peut se justifier de deux façons.

– Par des critères économiques : la rentabilité maximale est en effet réalisée pour des révolutions de 45 ans (Picard, 2009). Certaines études (Foley, 2009) utilisent le critère de Faustmann pour calculer la durée de révolution de l'itinéraire de base. Il aurait éventuellement pu être utilisé.

– Par des critères relatifs à la pratique commune : la tendance actuelle pour la majorité des propriétaires du Limousin est en effet d'exploiter leurs Douglas à 45 ans. La démonstration reste néanmoins difficile car il existe également de nombreux autres propriétaires qui conservent leurs peuplements au-delà de cet âge.

On suppose une répartition uniforme des classes d'âge par unité de surface égale. Autrement dit, **la forêt est composée de 45 parcelles de surface égales, chacune comportant un peuplement d'une tranche d'âge différente**. Ainsi, sur la figure 29, sont représentés les stocks de carbone de chaque parcelle. Le propriétaire récolte chaque année les bois d'une parcelle, donc de 1/45e de l'ensemble de sa propriété. Cette hypothèse est énoncée afin de masquer les effets temporels de la séquestration : le stock moyen de carbone pour l'itinéraire de base est donc toujours égal au stock moyen d'une révolution de 45 ans (154,6 tC/ha soit 567 tCO_2/ha).

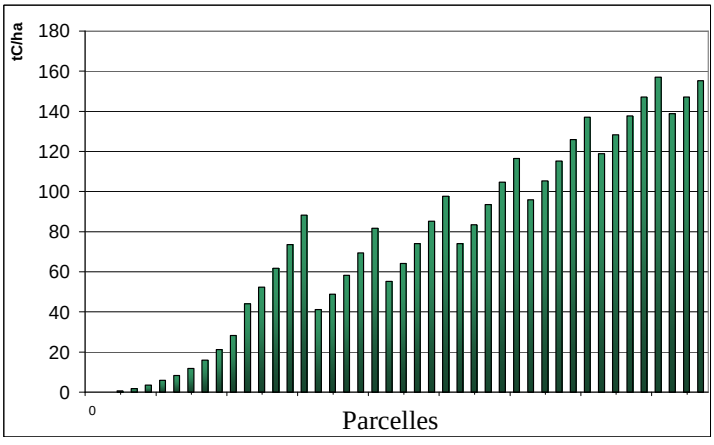


Figure 29. – Stock de carbone de chaque parcelle du scénario de référence du projet fictif.

- ***Scénario de projet***

Le projet prévoit **un allongement des révolutions de 10 ans** selon l'itinéraire technique décrit dans la partie 3.1.4.2. La transition vers l'itinéraire de projet est progressive puisqu'elle se fait parcelle par parcelle, en raison du supposé équilibre des classes d'âge sur l'ensemble de la propriété. Il n'y a donc pas de coupe lors des dix premières années du projet : l'augmentation de stock se fait pendant

cette période. Le tableau 16 donne un exemple de l'évolution de l'âge des peuplements pour quelques-unes des 45 parcelles.

Début du projet

	Âge du peuplement				
	année -2	année -1	année 0	année 1	année 2
Parcelle a	42	43	44	45	46
Parcelle b	43	44	45	46	47
Parcelle c	44	45	46	47	48
Parcelle d	45	1	2	3	4
Parcelle e	1	2	3	4	5

Tableau 16. – Âge des peuplements de quelques parcelles pendant la période de transition vers le scénario de projet.

- ***Séquestration additionnelle du projet***

On fait l'hypothèse que le projet est soumis aux critères du standard VCS. La durée est fixée à 20 ans (la durée des projets VCS doit être comprise entre 20 et 100 ans). La périodicité de vérification et de délivrance de crédits est fixée à **5 ans.**

La figure 30 permet de visualiser les quantités de carbone supplémentaires stockées sur la propriété pendant les 20 années du projet. **Les stocks en forêt et dans les produits bois sont pris en compte** (compartiments « biomasse aérienne », « biomasse souterraine » et « produits bois »). Les émissions évitées par substitution ne peuvent pas être considérées dans un tel projet pour cause de « double compte ».

Le stock total augmente pendant les dix première années en raison de l'absence de coupe, puis diminue légèrement et se stabilise. **Le nombre total de crédits carbone délivrés ne peut pas dépasser les quantités moyennes séquestrées par le changement d'itinéraire**. C'est pourquoi les quantités de carbone stockées par le projet sont limitées à 90,6 teqCO_2/ha (différence de stock moyen entre les deux scénarios de projet, soit 24,7 tC/ha comme calculé dans la partie 3.1).

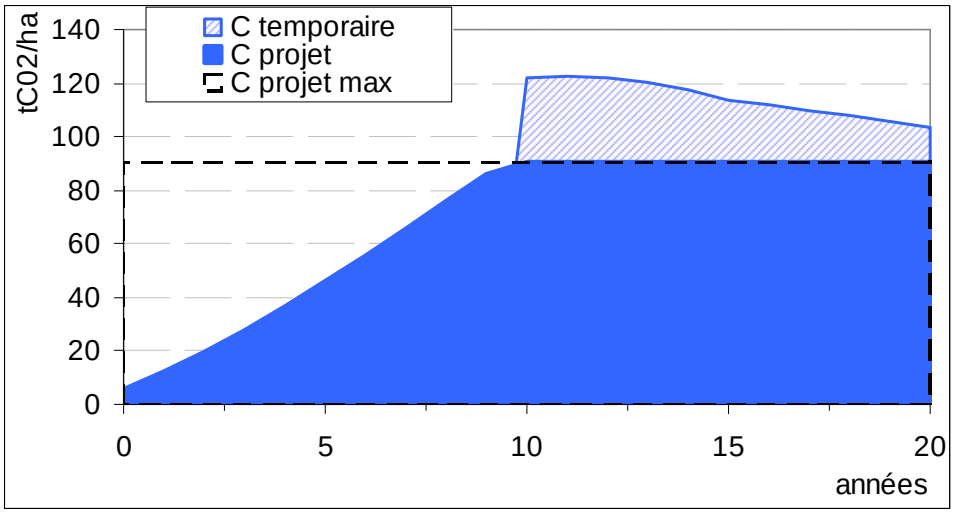


Figure 30. – Séquestration additionnelle au scénario de référence.

On notera que le fait d'inclure les stocks « produits bois » change la dynamique de stockage additionnel, mais que **ce compartiment contribue peu en valeur absolue à ce stock additionnel** au bout de 20 ans (9 %). Inclure ce compartiment peut engendrer des coûts supplémentaires (suivi et vérification des débouchés du bois, acquisition de données de durée de vie, etc.), sa pertinence est par conséquent discutable

4.3.2. Calcul des revenus

4.3.2.1. Revenus du carbone

- ***Mise en réserve***

Une analyse des risques conduit à placer une partie des crédits générés en réserve. Cette analyse permet de classer les risques en trois catégories (faibles, moyens et forts) en prenant en considération différents critères (probabilité de feu, probabilité d'exploitation illégale, existence de bois de très haute valeur en forêt). Vis-à-vis de ces critères, les risques pour un projet carbone d'allongement des révolutions en France sont bien moindres que pour un projet du même type en pays tropical. La catégorie de risque considérée est donc « risque faible » et **10 % des crédits sont donc mis en réserve** pour les risques liés aux tempêtes et aux changements climatiques.

Théoriquement, la part des crédits mis en réserve diminue au fur et à mesure des vérifications et une partie est restituée si les stocks prévus sont en effet mesurés. Dans une première approche, nous considérerons que la mise en réserve est de 10 % tout le long du projet et que ces crédits ne sont pas restitués. Le *release* est omis, mais une telle hypothèse ne doit pas influencer beaucoup les résultats.

- ***Prise en compte des fuites***

Un risque de fuite (*leakage*) dû au déplacement de l'exploitation abandonné ici pendant 10 ans vers d'autres forêts est à prendre en compte dans la démarche de certification VCS. Pour une augmentation des révolutions comprise entre 1 et 10 ans, VCS recommande l'utilisation d'un **risque de fuite faible (10 %).**

Les taux de mise en réserve et de fuite choisis sont identiques à ceux considérés pour des simulations de projets d'extension de révolution comparables (Foley, 2009, Galik *et al.*, 2009).

- ***Quantité de crédits générés***

Les crédits carbone issus d'un projet labellisé par le VCS sont appelés VCU (Volontary carbon units). Le graphique suivant permet de visualiser les VCU générés après déductions en raison des fuites et mise en réserve.

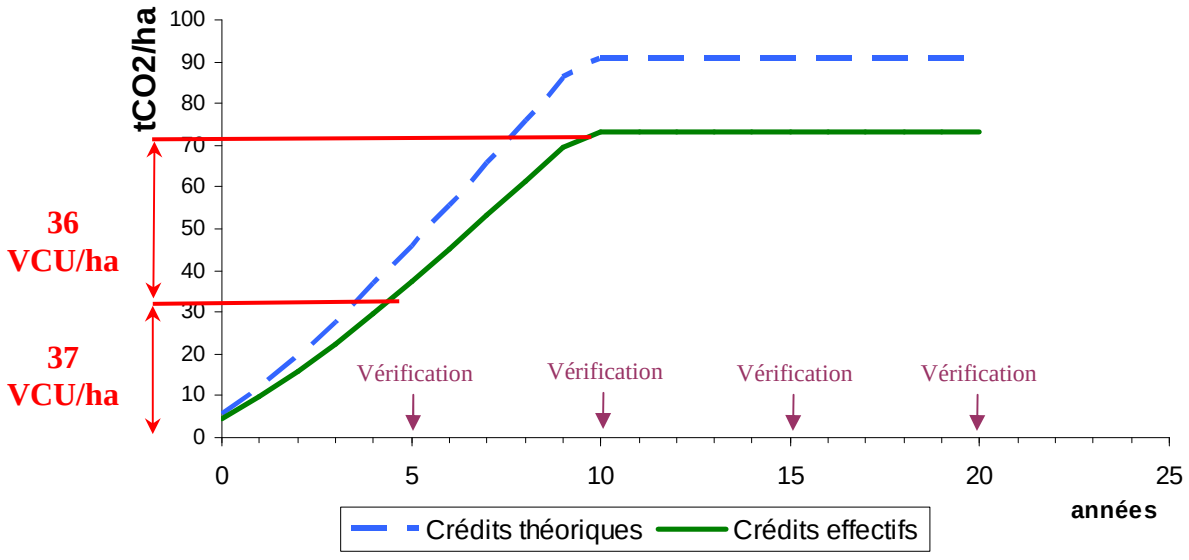


Figure 31. – Crédits carbone (VCU) délivrés lors du projet fictif

Le projet génère donc 37 crédits VCU à 5 ans et 36 VCU à 10 ans. Même s'il ne génère pas de VCU ultérieurement, ce projet doit être vérifié à 15 et 20 ans.

- ***Contrat de vente***

Pour les projets du mécanisme réglementaire MDP, les transactions de crédit carbone se font le plus souvent selon une vente de gré à gré sur le marché primaire qui intervient en amont du développement du projet ou de sa mise en œuvre, souvent même avant sa validation par un standard

(Chenost *et al.*, 2010). Cela nécessite l'établissement d'un contrat d'achat de réduction d'émissions vérifiées (CAREV). Ce contrat défini d'une part le prix et la quantité de crédits générés, et d'autre part les porteurs de risque. Toutefois, il est très rare que le paiement des crédits s'effectue avant d'être effectivement générés : c'est le cas pour seulement 3 % des crédits labélisés par le VCS (Hamilton *et al.*, 2010a). Par la suite, ne seront testés que des scénarios où les revenus carbone reviennent au porteur de projet lors de la vérification.

- ***Valeur des crédits***

Le prix de vente d'un crédit carbone dépend de plusieurs paramètres :

– le prix des crédits sur le marché ;

– la qualité du projet et des crédits vendus ;

– les risques associés à la délivrance du crédit.

Concernant la compensation volontaire, la qualité et la « valeur marketing » du projet peuvent avoir autant de poids pour l'acheteur que la recherche de réduction d'émission à bas coût. Ceci explique des prix de vente des crédits bien plus élevés que les prix du marché pour certains projets.

Dans le cadre de ce projet, d'une part la standardisation des crédits permet de garantir la qualité du projet et d'autre part le contexte socio-économique stable permet de limiter les risques (par rapport à un projet dans un pays du Sud par exemple). Grâce à la mise en réserve d'une partie des crédits, les crédits générés par un projet de type VCS sont permanents et ils sont donc générés à vie. Le prix de crédits permanents sur le marché est plus élevé que des crédits temporaires.

Le prix d'un crédit certifié par VCS varie de 1,3 à 28 € la tonne de CO_2 (Hamilton, 2010a). **Les prix sont donc très variables et soumis aux fluctuations d'un marché qui reste encore très volatil**. Il n'existe pour l'instant pas encore de projet certifié VCS dans la catégorie « gestion forestière améliorée », mais on constate cependant sur le marché de gré à gré que les crédits provenant de ce type de projet sont vendus à des prix supérieurs (Hamilton, 2010b). De même, on constate des prix de ventes plus élevés pour les projets situés sur le territoire de l'Union européenne : ce type de projet a donc toutes les raisons d'être en mesure de générer des crédits à des prix situés dans le haut de la fourchette. Pour la suite des calculs, plusieurs prix de vente seront testés. Le prix par défaut est fixé à la valeur moyenne constatée des crédits issus de projet de gestion forestière améliorée en 2009[2] : **6,2 €/tCO_2** (Hamilton, 2010a). On notera qu'il s'agit d'une **estimation basse** compte tenu de ce qui a été dit plus haut. On suppose dans le cas où les crédits sont délivrés *ex-post* que leur valeur devrait croître et on fait par conséquent l'hypothèse d'une hausse du prix de 5 % par an (les prix des crédits issus de projets de boisement ont montré une croissance de 7,6 % entre l'année 2008 et le premier semestre 2009).

4.3.2.2. Revenus du bois

Seuls les revenus carbone ont été considérés pour l'instant. Or un changement de scénario modifie et diffère dans le temps les revenus du bois : ceux-ci doivent être pris en compte dans le bilan. Les prix de vente des bois sont des prix couramment constatés en France en 2009 et 2010 (Picard, com. pers.). Ils sont présentés dans le tableau 17. On fait l'hypothèse que le fait de laisser les Douglas sur pied pendant dix années de plus engendre un important risque de chablis supplémentaire. **Ce risque est pris en compte** en supposant l'occurrence d'une tempête de forte intensité qui touche l'ensemble des peuplements de plus de 45 ans et ayant un temps de retour de 25 ans. Ainsi, pour toutes les récoltes après 45 ans, 4 % du volume de bois est vendu à une valeur de récupération égale à 40 % de la valeur normale.

Prix bois à 45 ans	65 €/m^3	Volume sur pied à 45 ans	500 m^3
Prix bois d'éclaircie entre 45 et 55 ans	45 €/m^3	Volume prélevé entre 45 et 55 ans	90 m^3
Prix bois à 55 ans	70 €/m^3	Volume sur pied à 55 ans	600 m^3

Tableau 17. – Hypothèses d'exploitation des bois

[2] Le taux de change utilisé pour la conversion de devise est de 1,265 dollars pour 1 euro.

4.3.3. Coût de mise en place du projet carbone

On peut distinguer trois types de coûts liés à un projet carbone forestier : les coûts techniques, les coûts dits de transaction liés à la standardisation et les coûts liés à la gestion et au pilotage du projet. Dans le cas présent, les coûts indépendants de l'aspect carbone du projet peuvent être considérés comme identiques pour les deux scénarios. **On ne s'intéresse donc qu'aux coûts supplémentaires liés à la composante carbone**, c'est-à-dire les coûts dits « de transaction » et une partie des coûts de gestion.

4.3.3.1. Coûts de transaction

La réalisation des différentes étapes d'un projet carbone se traduit par des coûts de transaction. Hormis les coûts de monitoring, **ces coûts sont relativement peu sensibles à la taille du projet**. Les petits et très petits projets sont donc pénalisés. Toutefois, des méthodes existent pour regrouper des petits projets et ainsi limiter les coûts qui y sont associés.

Les coûts de transaction retenus sont présentés dans le tableau 18.

Étapes	Produits	Coût	Source
Préfaisabilité	Note d'idée de projet (NIP)	5 k€	Chenost *et al.*, 2010
Faisabilité & mise en œuvre	Développement d'une nouvelle méthodologie (optionnel)	-	
	DDP	50 k€	Chenost *et al.*, 2010
	Validation du DDP par un tiers externe : Entité Opérationnelle Désignée (EOD)	35 k€	Chenost *et al.*, 2010
Opération	Monitoring – suivi des réductions d'émissions	47 €/ha (à chaque vérification)	Galik *et al.*, 2009
	Vérification par un tiers externe (EOD)	14 €/ha (à chaque vérification)	Galik *et al.*, 2009
	Frais de registre	0,05 €/VCU	CDC (2009)
	Frais de délivrance	0,082€/VCU	VCS (2010)

Tableau 18. – Coûts de transaction

L'ensemble des coûts de préfaisabilité, faisabilité et mise en œuvre s'élèvent à **90 k€** (hors coût de monitoring et vérification). On notera que cette estimation des coûts est élevée : c'est plus du double des valeurs retenues par Deheza et Bellassen (2010), soit 40 k€. Par ailleurs, les coûts fixes de transaction d'un projet certifié par le VCS sont jusqu'à deux fois plus élevés que les coûts de projets certifiés par d'autres standards (Guigon, 2009). La pertinence d'utiliser ce standard pour de petits projets peut donc largement être remise en question.

4.3.3.2. Coûts de gestion

Ils comprennent les coûts de gestion, de financement, de pilotage, ou encore de communication liés à un projet. D'après Chenost *et al.*, (2010), ces coûts peuvent être compris entre 8 et 44 % des coûts globaux. Nous prendrons ici l'hypothèse basse car une bonne partie des coûts est incluse dans les frais de gestion « classique ». Par conséquent, les surcoûts de gestion liés à l'aspect carbone du projet sont estimés à **5,2 k€**.

Les coûts totaux liés à la composante « carbone » du projet (y compris monitoring et vérification) pour un projet sont donc estimés compris entre **100 k€** (projet de 100 ha) et **283 k€** (projet de 5000 ha). Ces estimations sont cohérentes avec celles constatées sur différents projets par

l'ONFI (entre 100 et 300 k€ selon Chenost *et al.*, 2010). De telles hypothèses de coûts peuvent néanmoins être jugées élevées car il est possible d'internaliser certaines opérations. Ainsi, les coûts de rédaction du DDP pourront être réellement plus faibles que 50 k€.

4.3.4. Hypothèses du calcul économique

L'hypothèse de base de ce calcul économique considère un propriétaire ayant un peuplement de Douglas de 45 ans. Il a le choix entre exploiter ses bois de suite ou laisser les arbres sur pied 10 ans de plus. S'il vend immédiatement les arbres, il touche les revenus de la vente du bois et peut ensuite placer cet argent pour bénéficier des intérêts de son placement durant les dix années suivantes. Dans le cas où il choisit de laisser ses Douglas sur pied dix années de plus, il touchera un revenu de vente de bois plus important, mais plus tardivement. **La comparaison se fait entre un propriétaire qui exploite à 45 ans et place son argent et un propriétaire qui exploite ses bois à 55 ans, sans aspect carbone dans un premier temps. Dans un second temps, on considère que le deuxième propriétaire participe à un projet carbone et valorise la séquestration additionnelle qu'il a provoquée en repoussant la coupe de ses douglas de 10 ans.** Les coûts et les revenus inhérents à un projet carbone interviennent alors.

Dans les deux cas, le bilan économique des 45 premières années est identique pour les deux propriétaires et n'est donc pas traité. Au final, cela revient à comparer **le rendement financier obtenu en laissant les arbres sur pied avec ou sans composante carbone à un taux de placement**. Le calcul est réalisé sur **trois tailles de propriétés différentes :** 100, 1 000 et 5 000 ha.

4.3.5. Calculs économiques

4.3.5.1. Valeur actualisée nette

On examine la possibilité pour un propriétaire qui a prévu d'exploiter ses Douglas à 45 ans d'attendre et de ne les couper qu'à l'année 55. La valeur actuelle nette (VAN) de faire ce changement d'itinéraire est calculée, avec et sans composante carbone. La VAN est évaluée à la date de la récolte initialement prévue, c'est à dire lorsque les Douglas ont 45 ans. On a :

$$\mathbf{VAN\ (€/ha) = Rbe + Rb_{55}\ (+ Rc) - Cb_{45}\ (- Cc)}$$

Où :
Rbe représente les recettes actualisées de la vente du bois des éclaircies entre 45 et 55 ans en €/ha,
Rb_{55} représente les recettes actualisées de la vente du bois de la coupe finale à 55 ans en €/ha,
Rc représente les recettes actualisées issues de la vente de crédits carbone du projet en €/ha,
Cb_{45} constitue la valeur actualisée des bois à 45 ans (au début du projet) en €/ha,
Cc représente les coûts liés à la composante carbone du projet en €/ha.

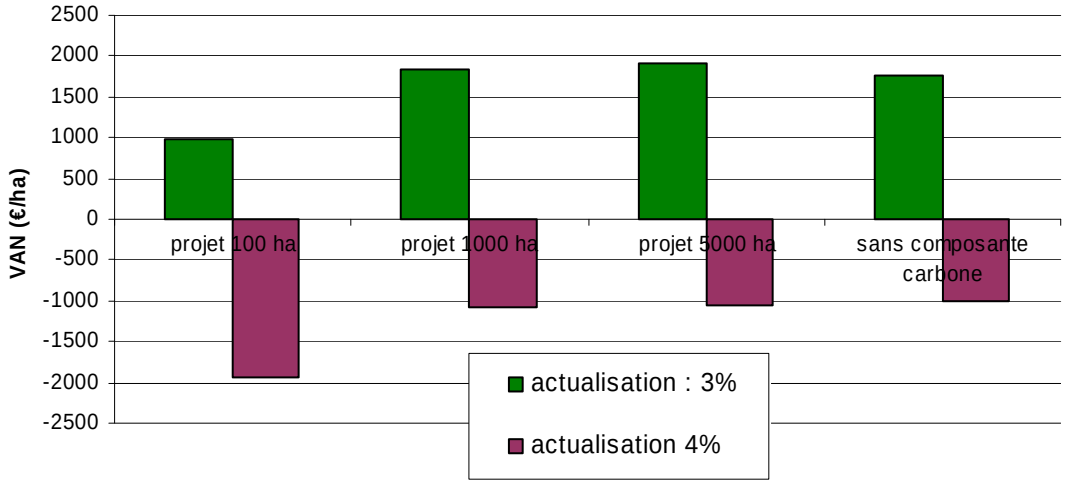


Figure 32. – Comparaison des VAN obtenues

Pour un taux d'actualisation de 4 %, la VAN est négative, que l'on intègre une composante carbone au projet ou non, et ce quelle que soit la taille du projet. Le choix des hypothèses de prix de vente des bois peut cependant être discuté : ainsi on obtient une VAN positive si les bois de 55 ans se vendent à 75 €/m^3 au lieu de 70 €/m^3. De même, la valeur de vente des crédits carbone est faible.

Ce qu'il est important de noter, c'est **la faible importance du revenu carbone par rapport au reste**. L'ajout d'une composante carbone au projet ne permet pas d'améliorer la VAN pour le projet de 100 ha, et elle ne compte que pour 2 % et 6 % de la VAN respectivement dans les projets de 1000 ha et 5000 ha.

Les calculs de cette étude ont été menés sans tenir compte du fait qu'un allongement des révolutions décale dans le temps les coûts et revenus des révolutions suivantes. Même si on peut raisonnablement penser que cet effet n'aura que peu d'incidence sur les résultats obtenus, cela demande à être vérifié par des calculs économiques en séquence infinie.

4.3.5.2. Taille minimale critique de projet

La taille minimale critique de projet se définit comme la surface minimale de projet à partir de laquelle les revenus actualisés de la vente des VCU compensent les coûts actualisés liés à la composante carbone. Elle correspond à la taille de projet pour laquelle la VAN est la même avec ou sans composante carbone.

Cette **taille minimale critique de projet** est ici **de 700 ha.** Elle est supérieure à celle calculée pour un projet de boisement par Deheza et Bellassen (2010). Cela s'explique par le fait que ce projet génère moins de crédits qu'un projet de boisement.

4.3.5.3. Taux interne de rentabilité

Le taux interne de rentabilité (TIR) se défini comme la valeur du taux d'actualisation pour lequel la VAN s'annule. Le TIR est calculé pour différentes tailles de projets et divers prix de vente des crédits carbone. Les résultats sont présentés dans la figure 33.

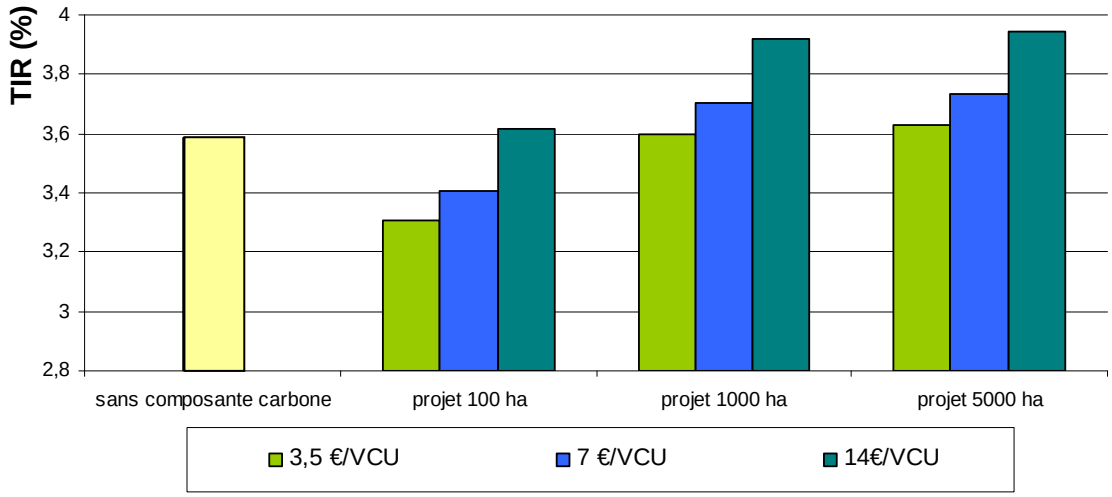


Figure 33. – Comparaison des TIR pour différents prix de vente de crédits

On constate que pour le passage de 45 à 55 ans, sans composante carbone, le TIR est de 3,6 % environ. Avec une composante carbone, le TIR n'est amélioré qu'à partir d'une certaine surface de projet (voir partie 4.3.5.2.), et d'un prix de vente minimum des crédits. Même pour les projets de taille importante (5 000 ha), **l'augmentation du TIR relative au projet carbone est très peu significative**. Néanmoins, on a vu que les prix du CO_2 étaient très variables suivant les projets et il est donc envisageable d'avoir des valeurs de VCU bien plus élevées que celles choisies en hypothèse.

On calcule ainsi le prix de vente des VCU nécessaire afin d'obtenir un TIR de 4 %, puis de 5 % (voir figure 34). Pour un projet de 1 000 ha et plus, le prix des crédits carbone doit être d'environ 16 €/VCU et 47 €/VCU pour faire passer le TIR de 3,59 % (projet sans composante carbone) à 4 % et 5 % respectivement.

Figure 34. – Prix des crédits carbone nécessaires pour obtenir différents TIR

4.3.6. Conclusion du bilan économique de cette étude de cas fictive

Même si le projet imaginé ici est fictif, la quantification de la séquestration additionnelle se base sur une étude de cas. Les coûts et revenus des projets carbone standardisés sont très variables et dépendent beaucoup du contexte du projet. On dispose pour l'instant de peu de recul sur le sujet. Néanmoins, ce bilan économique permet de dresser quelques conclusions.

Les revenus issus d'un projet de ce type sont faibles au regard des revenus du bois. Bien qu'il soit clair que **les revenus du carbone resteront des revenus complémentaires** à ceux du bois, **des prix de vente du carbone plus élevés peuvent être espérés à l'avenir.**

En raison de coûts fixes incompressibles liés à la labellisation des crédits délivrés, **il est indispensable que les projets soient de taille importante**. En forêt privée, cela implique la nécessité de regrouper les propriétaires par l'intermédiaire d'une structure adéquate qui mutualiserait les surfaces. Ce regroupement aura lui aussi un coût.

5. Discussion et perspectives

5.1. Des méthodes de quantification à optimiser pour réduire les erreurs

Ce travail n'a que pour objectif de donner des ordres de grandeur des quantités de carbone séquestrées ou dont l'émission a été évitée. La diversité de la forêt française, aussi bien en termes d'essences qu'en termes de conditions écologiques et de traitement sylvicole complique l'estimation du « bilan carbone » forestier. Les **incertitudes liées à ces estimations peuvent être très importantes** et rendre inexploitables les estimations fournies (Nys *et al.*, 2008). Une limite importante de ce travail est qu'il ne donne pas d'intervalle de confiance des résultats annoncés. Une étude de sensibilité aurait pu permettre d'approcher les incertitudes liées à la méthode. Toutefois, l'emploi d'hypothèses conservatrices permet d'utiliser les résultats. Ceux-ci doivent cependant être affinés par la suite pour en réduire l'incertitude.

Des méthodes d'estimation de la biomasse aérienne plus robustes que celles employées ici pourraient permettre de réduire l'erreur : cela nécessite par exemple le développement d'équations allométriques pour le châtaignier ou pour d'autres traitements que la futaie régulière. A ce sujet, les travaux de l'INRA concernant la modélisation générique de la distribution du volume et de la biomasse dans les arbres individuels pourraient fournir des outils intéressants pour la « quantification carbone ». De plus, les méthodes permettant d'apprécier la biomasse racinaire engendrent de fortes approximations. Cependant, compte-tenu des coûts très importants liés à la construction de facteurs d'expansion racinaires spécifiques à chaque essence, il sera difficile de réduire les incertitudes à ce niveau.

Certains compartiments ont été écartés pour cette étude. Cette hypothèse doit être discutée.

- Le stock de carbone du sol, considéré comme constant, peut tout de même varier selon les scénarios. Dans les deux cas considérés, l'allongement des révolutions devrait cependant plutôt contribuer à diminuer les émissions de carbone du sol. Le sol émet en effet d'importantes quantités de carbone lors des coupes rases. Avec l'allongement du cycle de production, ces émissions sont moins fréquentes.
- La biomasse du sous-étage a été considérée comme négligeable. Or, dans des peuplements clairs, cette biomasse peut devenir importante. Ce pourrait être le cas pour le scénario de conversion des taillis de châtaignier où les éclaircies simulées sont relativement fortes. Cependant, il s'agit encore une fois d'une hypothèse conservatrice puisque les stocks de carbone ont plutôt été sous estimés dans ce scénario alternatif.

La modélisation de la croissance des arbres a été traitée dans cette étude en utilisant des tables de production. **L'utilisation de modèles de croissance à sylviculture variable est plus appropriée** car elle permet de reproduire et de faire varier plus finement différents itinéraires sylvicoles. Des recherches récentes ont également mis en évidence une hausse de la productivité forestière pour le hêtre et le chêne sessile dans le Nord-Est de la France (Bontemps, 2006). Loin d'être négligeable, cette augmentation de la croissance s'explique par l'augmentation des dépôts azotés, la hausse des températures et de la concentration en CO_2. Une autre étude démontre que les changements climatiques, après avoir provoqué une augmentation de la productivité, ont engendré entre 1987 et 2004 une diminution de cette dernière sur le hêtre en raison de la limitation de la ressource en eau (Charru *et al.*, 2010). Quels qu'en soit la nature, **les bouleversements de la productivité forestière devraient être intégrés dans les modèles de croissance** afin de mieux correspondre à la réalité. Il en va de même pour l'augmentation des risques liés aux changements climatiques, qui ne sont pas pris en compte ici.

Les données d'émissions évitées par effet de substitution qui sont fournies dans cette étude sont sujettes à discussion car leur estimation repose sur de nombreuses hypothèses. Celles-ci sont relatives aux catégories de valorisation du bois produit au terme des cycles sylvicoles et aux

matières qui sont substituées par le bois. Ces paramètres ont de fortes chances d'évoluer dans le temps : il est difficile de prédire quelles seront les utilisations du bois dans plusieurs décennies, si l'utilisation du bois se fera au détriment d'autres matières premières et quel sera le bilan carbone de ces dernières. Même s'il est indispensable d'en tenir compte, l'estimation de l'effet de substitution reste donc sujette à discussions. Concernant tous les aspects liés au bilan carbone des produits bois, les analyses de cycle de vie (ACV) devraient fournir des données permettant d'améliorer les estimations.

Enfin, il est important de rappeler que **les résultats présentés dans ce travail sont valables localement** et pour les conditions stationnelles des sites étudiés. La même méthodologie sera employée avec d'autres classes de fertilité pour des stations différentes.

5.2. Projets non standardisés : une première étape

La labellisation des projets carbone par des standards internationaux apparait comme la voie à suivre à moyen terme pour assurer la crédibilité des démarches de valorisation du carbone en forêt (voir paragraphe 4.1.). **Toutefois, la mise en place de projets non standardisés peut constituer une première approche.**

Ainsi, de nombreux projets carbone forestiers ne sont aujourd'hui pas encore enregistrés, ni même en cours d'enregistrement auprès d'un standard : sur les 434 projets carbone forestiers recensés par l'ONFI en 2009, seuls 136 entrent dans une démarche de standardisation (MDP, MOC et standards volontaires confondus) (Chenost *et al.*, 2010). Ce sont surtout les projets de petite taille qui ne sont pas encore entrés dans une démarche de standardisation : c'est le cas de 55 des 59 projets de moins de 100 ha recensés par l'ONFI.

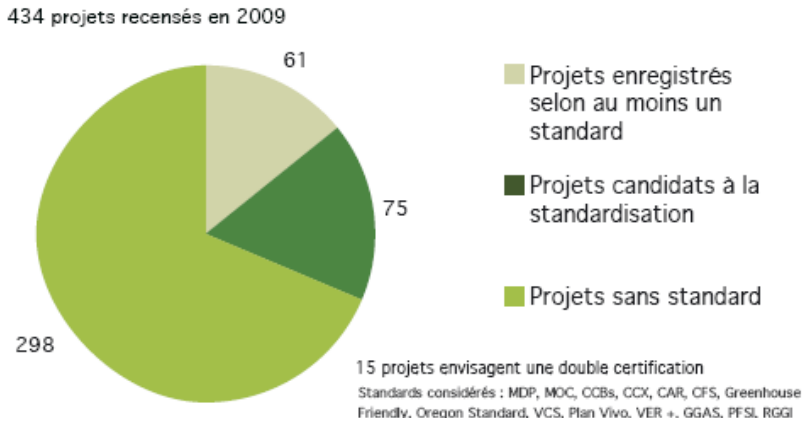


Figure 35. – Part des projets entrant dans une démarche de certification. Source : ONFI, 2010.

Ainsi, avant de viser la standardisation de tous les projets, la mise en place d'initiatives sous la forme de mécénat est possible, et ce d'autant plus qu'elles sont de petite taille. Les critères de qualité exigés par les standards devront tout de même être suivis pour assurer la crédibilité des projets et pour permettre d'entrer ultérieurement dans une démarche de standardisation. Les standards permettent en effet dans une certaine mesure de labelliser des projets ayant déjà commencés. Pour des petits projets, l'approche « mécénat » permettrait ainsi de s'affranchir des importants coûts fixes de standardisation dans un premier temps. Ceux-ci deviendraient « supportables » si plusieurs petits projets étaient ensuite rassemblés.

5.3. Vers une nécessaire réflexion sur le regroupement des propriétaires en forêt privée

Comme démontré dans le paragraphe 4.3.4., la mise en place de projet carbone certifié n'est rentable qu'à partir d'une taille minimale. Cette taille minimale de projet est estimée à 700 ha pour l'étude de cas d'allongement des révolutions du Douglas (paragraphe 4.3.4.), ou encore à 400 ha dans l'étude de cas d'un boisement par Deheza et Bellassen (2010). Les projets en place au niveau

international sont d'ailleurs souvent de taille importante : la récente étude de l'ONFI montre que la taille moyenne des projets de boisement et reboisement (AR) standardisés est de 3 764 ha. Alors que la forêt privée française est extrêmement morcelée (les propriétaires forestiers privés français possèdent en moyenne 2,6 ha), **un regroupement de propriétés est nécessaire pour que des projets carbone voient le jour en forêt privée.**

Une structure porteuse de projets doit rassembler un nombre suffisant de propriétés forestières et contractualiser avec les propriétaires. L'établissement d'un contrat permettra d'obtenir de leur part un engagement à respecter les conditions du projet et à céder leurs droits carbone en échange du revenu de la vente de ceux-ci. Le porteur de projet est alors le seul lien avec le standard et les auditeurs externes. Ce sont probablement les organismes de gestion (experts forestiers, techniciens indépendants et coopératives) qui pourraient jouer le mieux ce rôle. De part l'importante surface qu'ils ont en gestion, ces organismes pourraient être des porteurs de projet. De même qu'ils prennent parfois en charge l'achat des bois puis leur revente, les gestionnaires pourraient acheter leurs droits carbone à chaque propriétaire, puis les revendre en tant que crédits carbone standardisés sur le marché. Ils prendraient ainsi en charge par la même occasion les frais de standardisation. La traçabilité et le suivi du projet sont facilités puisque c'est un seul et même gestionnaire qui induit les changements de gestion du projet. Les syndicats départementaux, parce qu'ils fédèrent un nombre important de propriétaires forestiers, pourraient également jouer un rôle similaire. Les CRPF, qui ont des missions d'organisation et de regroupement de la forêt privée auraient un rôle de facilitation du rapprochement des acteurs, en initiant certains regroupements et en informant les propriétaires. Les CRPF pourraient aussi participer à la formation des différents acteurs et servir d'appui technique si nécessaire. Le service recherche et développement du Centre national de la propriété forestière (CNPF) trouverait toute sa place dans son rôle de transfert en coordonnant l'action des CRPF et réalisant le transfert de la recherche vers la gestion.

5.4. Carbone et multifonctionnalité forestière

L'intérêt de plus en plus grand porté à la prise en compte du carbone forestier peut susciter des interrogations quant à sa compatibilité avec les aspects économiques (production de bois principalement), environnementaux et sociaux, piliers du développement durable des forêts françaises. Des éléments de réflexion concernant l'articulation de la fonction « carbone » avec les autres rôles des forêts sont donc présentés ici.

Le rôle de production de bois est bien souvent le seul à engendrer un revenu pour le propriétaire forestier. Dès lors que les aspects liés au stockage dans les produits bois et à l'effet de substitution sont pris en compte dans le bilan carbone, l'optimisation de ce dernier n'entre pas en contradiction avec la production de bois d'œuvre. Par exemple, en futaie régulière, les scénarios optimisant le rôle de « pompe à carbone » joué par la forêt sont probablement ceux où on exploite les arbres au moment où leur accroissement courant devient inférieur à l'accroissement moyen. En revanche, si le seul rôle de séquestration en forêt est considéré, les scénarios de non-gestion peuvent être favorisés puisqu'ils optimisent le stock de carbone forestier notamment grâce à un taux de bois mort très élevé (Vallauri *et al.*, 2003). Sur le long terme et en incluant au bilan le bénéfice lié à l'utilisation des produits bois, l'abandon de la gestion joue un rôle négatif dans la lutte contre l'effet de serre, comme l'a montré l'étude menée en Suisse par Taverna *et al.* en 2007. **Il est donc primordial que les décideurs prennent en compte l'effet de substitution** (aussi bien concernant les politiques forestières nationales qu'à l'échelon du gestionnaire forestier).

Les choix de gestion favorisant la production de bois d'œuvre de qualité à destination de la construction, sont les plus bénéfiques vis-à-vis de l'atténuation du changement climatique. Ils optimisent en effet le stock de carbone en forêt, l'effet de substitution matériau et un effet de substitution énergétique si les produits sont recyclés en fin de vie (utilisation en cascade). Ce n'est pas le cas des cultures dédiées à la production de bois énergie qui n'ont qu'un effet de substitution énergétique. Les itinéraires de production de bois d'œuvre de qualité ont une biodiversité plus élevée que les taillis à courte ou à très courte rotation destinés à produire du bois énergie (Landmann, 2009).

En ce sens, les enjeux « carbone » et « biodiversité » convergent. Dans certains cas, la transformation de peuplements feuillus en peuplements résineux à productivité plus élevée pourrait permettre d'optimiser le rôle de pompe à carbone. Une attention particulière devra être portée à la diversité des essences avec un éventuel maintien d'îlots de feuillus pour ne pas trop éroder la biodiversité. L'utilisation d'indicateurs simples tels que l'indice de biodiversité potentiel (IBP) (Larrieu et Gonin, 2009) pourrait permettre le suivi de la biodiversité dans les projets carbone.

Enfin, concernant le rôle social de la forêt, **des projets carbone forestiers permettraient de renforcer l'image positive du public vis-à-vis de la forêt**. Le carbone pourrait être un vecteur d'une image méliorative de la forêt gérée qui permet à la fois la préservation de l'écosystème et la production de bois, matériau écologique et renouvelable.

La fonction d'atténuation du changement climatique jouée par la forêt ne doit donc pas remplacer les autres rôles des forêts françaises : on ne doit pas tendre vers de la « carboforesterie », mais bien intégrer la fonction de pompe à carbone aux autres enjeux des forêts multifonctionnelles. À l'instar de l'IBP pour la biodiversité, un indice simple mais validé scientifiquement pourrait être créé pour le carbone. Il offrirait aux propriétaires la possibilité de prendre en compte le bilan carbone comme un élément parmi d'autres lors de leurs décisions de gestion.

5.5. Un cadre réglementaire nouveau pour l'après 2012 ?

Les hypothèses de développement des marchés volontaires prises dans le cadre de ce travail sont relatives au cadre réglementaire actuellement en place (voir paragraphe 1.2.). Mais ce cadre n'est fixé que jusqu'à l'horizon 2012. À la veille de la 16e conférence des parties qui se déroulera en novembre 2010 à Cancun, le devenir de la forêt est incertain au sein des mécanismes de projet carbone. **Les signaux envoyés lors des dernières négociations laissent toutefois entrevoir un avenir positif pour la forêt au sein des marchés du carbone**. Les principales discussions portent sur l'avenir du mécanisme REDD, qui pourrait devenir REDD+ et inclure la gestion forestière améliorée. La mise en place du processus REDD+ devrait renforcer la place de la forêt au sein des marchés du carbone, même si cela ne concerne directement que les pays en voie de développement.

Concernant la séquestration due à la gestion forestière, le plafond des 3,2 $MtCO_2$ fixé pour la France n'incite pas à la mise en place de projets domestiques (voir paragraphe 1.2). Toutefois, ce plafond pourrait être modifié pour la période 2013-2020. C'est dans ce sens que la Belgique et la commission européenne, au nom de l'Union européenne et de ses membres a dernièrement présenté une soumission à la CCNUCC (Commission Européenne, 2010). Une réévaluation des plafonds de l'article 3.4. pour l'après 2012 pourrait ainsi pousser l'État français à mettre en place des projets domestiques de gestion forestière améliorée. Ce possible changement du cadre réglementaire ne doit pas influer négativement sur la mise en place de projets volontaires, qui peuvent avoir un rôle précurseur bénéfique. En effet, de la même façon que ce fut le cas pour les projets de boisement du MDP, l'expérience préalablement acquise grâce aux projets volontaires sera utile par la suite pour d'éventuels projets domestiques.

Conclusion

Le rôle majeur joué par la forêt française vis-à-vis de l'atténuation du changement climatique est reconnu par le GIEC et constitue une revendication du milieu forestier depuis plusieurs années. Paradoxalement, peu d'études portent sur la quantification carbone de peuplements forestiers déjà en place. La méthode proposée dans le cadre de ce stage permet un premier pas vers la quantification « carbone » du geste sylvicole adaptée à la forêt privée. Même si les estimations sont entachées d'incertitudes, l'emploi d'hypothèses conservatrices a permis de fournir les ordres de grandeur du bilan carbone de plusieurs scénarios sylvicoles. C'est la quantification de l'effet de substitution qui pose le plus de problèmes méthodologiques. Une attente importante se porte donc sur les résultats qui devraient être amenés par les analyses de cycle de vie des produits bois et de ses produits concurrents.

Cette étude a permis d'identifier des changements de gestion sylvicole qui ont un effet additionnel non négligeable sur la séquestration de carbone. Sur une station de bonne fertilité, en allongeant de dix ans les révolutions d'une futaie régulière de Douglas, l'augmentation des stocks de carbone moyen (en forêt et dans les produits bois) est estimée à 24,7 tC/ha. C'est presque six fois plus que les émissions moyennes annuelles d'un ménage français (4,2 teqC/an d'après l'ADEME, 2008). L'amélioration d'un taillis de châtaignier pour produire du bois d'œuvre peut également engendrer un effet de stockage positif. Ceci est d'autant plus vrai que le scénario de référence (taillis simple), a une durée de révolution courte. De tels exemples illustrent le fait que l'optimisation du bilan carbone forestier se fait plutôt grâce à une sylviculture visant à produire du bois de qualité que par des productions favorisant exclusivement la valorisation énergétique du bois. L'étude d'autres scénarios de « gestion forestière améliorée » tels que la substitution d'essence permettraient de compléter la liste des actions sylvicoles envisageables pour optimiser la séquestration de carbone.

Au même titre que d'autres fonctions récréatives ou écologiques (accueil du public, protection de la ressource en eau, lutte contre l'érosion, maintien de la biodiversité), la séquestration de carbone est un service non marchand rendu par la forêt. Affecter des valeurs économiques aux services est un moyen de mieux prendre en compte ces services rendus à la collectivité. La valorisation économique de la séquestration de carbone permettrait un premier pas dans ce sens tout en diversifiant les revenus des propriétaires. Alors que les mécanismes réglementaires du protocole de Kyoto ne permettent pas la mise en place de projets carbone en France, les forestiers se tournent naturellement vers les marchés de la compensation volontaire. La recherche de rigueur et de crédibilité oblige les organismes potentiellement porteurs de projet à se tourner vers les standards internationaux qui labellisent ces initiatives. Le bilan économique réalisé sur une étude de cas d'allongement des révolutions en futaie régulière de Douglas montre que la taille minimale critique pour les projets carbone est de l'ordre de 700 ha. Dans un contexte de forêt privée française morcelée, la taille des projets carbone risque de poser question. Comme pour d'autres thèmes tels que la mobilisation des bois, le regroupement des propriétaires sera plus que nécessaire.

Enfin, rappelons qu'il est primordial que les politiques forestières d'atténuation des changements climatiques soient compatibles avec les mesures d'adaptation. En effet, l'évolution du climat engendre des risques importants pour nos forêts. S'ils ne sont pas anticipés, les écosystèmes forestiers pourraient passer du statut de puits à celui de source de carbone.

Références bibliographiques

AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE. 2008 – *Les chiffres clés des émissions de CO2 en 2002* – Paris : ADEME – 4 p.

AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE. 2010 – *Guide des facteurs d'émission.* – Paris : ADEME – 240 p. (Version 6.1)

AUCLAIR (Daniel) et BIGE (Marie Claude). 1984 – Une méthode d'estimation régionale de la biomasse des taillis à partir de données de l'inventaire forestier national. Application à la région centre. – *Annales des sciences forestières*, vol. 41, n° 4, p. 405-426.

BONTEMPS (Jean-Daniel). 2006 - *Évolution de la productivité des peuplements réguliers et monospécifiques de hêtre (Fagus sylvatica L.) et de chêne sessile (Quercus petraea Liebl.) dans la moitié Nord de la France au cours du XX*e *siècle.* – Nancy : École nationale du génie rural, des eaux et des forêts – 357 p. (Thèse de doctorat).

BOURGEOIS (Catherine), SEVRIN (Éric) et LEMAIRE (Jean). 2004 – *Le châtaignier : un arbre, un bois.* – Paris : Institut pour le développement forestier – 347 p. (2é édition).

CAIRNS (Michael), BROWN (Sandra), HELMER (Eileen) et BAUMGARDNER (Greg). 1997 – Root biomass allocation in the world's upland forests. – *Oecologia*, vol. 111, n° 1, p. 1-11.

CAPTA CARBONE. 2010 – *Brochure de présentation de l'entreprise*. – Grandchamp : Capta Carbone – 2 p.

CARBON FIX STANDARD. 2008 – *Criteria & Methodology* – 27 p.

CENTRE INTERPROFESSIONNEL TECHNIQUE D'ÉTUDE DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE. 2010 – *Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques et du protocole de Kyoto* – Paris : CITEPA – 177 p. (édition d'avril 2010).

CENTRE RÉGIONAL DE LA PROPRIÉTÉ FORESTIÈRE DE RHÔNE-ALPES. 2009 – *La cession de droit carbone en forêt de Chambaran* – Lyon : CRPF Rhône Alpes – 8 p.

CENTRES D'ÉTUDES TECHNIQUES ET ÉCONOMIQUES FORESTIÈRES DE LA MAYENNE. 2007 – *Étude économique comparée de deux types de sylviculture du Douglas* – Laval : CETEF Mayenne – 6 p.

CHARRU (Marie), SEYNAVE (Ingrid), MORNEAU (François) et BONTEMPS (Jean Daniel). 2010 – Recent changes in forest productivity: An analysis of national forest inventory data for common beech (Fagus sylvatica L.) in north-eastern France – *Forest Ecology and Management*, n° 260, p. 864-874

CHENOST (Clément), GARDETTE (Yves-Marie), DEMENOIS (Julien), GRONDARD (Nicolas), PERRIER (Martin) et WEMAËRE (Matthieu). 2010 – *Les marchés du carbone forestier : bringing forest carbon projects to the market.* – Paris : Office national des forêts international – 170 p.

CHENOST (Clément), RUBIO (Marianne). 2008 – Forêt, bois énergie, bois matériau et carbone. – *Rendez-vous techniques*, n° 20, p. 41-43.

COLIN (Francis), VINKLER (Isabelle), RIOU-NIVERT (Philippe), RENAUD (Jean Pierre), HERVÉ (Jean-Christophe), BOCK (Jérôme) et PITON (Benjamin). 2009 – Facteur de risque de chablis dans

les peuplements forestiers : les leçons tirées des tempêtes de 1999. Dans : *La forêt face aux tempêtes*. Versailles : Quæ, p. 177-228 (Collection Synthèses).

COMMISSION EUROPÉENNE. 2010 – *Submission by Belgium and the European commission on behalf of the European Union and its member states. Reference levels for Forest Management* – Bruxelles : European commission – 34 p.

DE CHAMPS (Jean). 1997 – La production du Douglas. – Dans : *Le Douglas.* – Paris : Association forêt cellulose, p. 280-332.

DEHEZA (Mariana) et BELLASSEN (Valentin). 2010 – *Valorisation carbone de la filière forêt-bois en France* – Paris : Mission climat de la Caisse des Dépôts – 52 p. (Étude climat n° 20).

DRÉNOU (Christophe). 2008 – Forêts et carbone : entre doutes et certitudes. - *Forêt entreprise,* n° 181, p. 9-41.

DUPOUEY (Jean Luc), PIGNARD (Gérôme), HAMZA (Nabila), DHÔTE (Jean-François). 2010 – Estimating carbon stock and fluxes in forest biomass : application to the French case upon National Forest Inventory data. – Dans : *Forests, Carbon Cycle and Climate Change.* Versailles : Edition Quae, p. 101-129 (Collection Update sciences et technologies).

ECOSECURITIES. 2009 – *The forest carbon offsetting survey 2009* – 33 p.

FÉDÉRATION NATIONALE DES COMMUNES FORESTIÈRES. 2005 – *Querrien : Céder les droits carbone d'une plantation* – Paris : FNCOFOR – 2 p.

FRÜHWALD (Arno), WELLING (Johannes), SCHARAI-RAD (Mohammad). 2003 - *Comparison of wood products and major substitutes with respect to environmental and energy balances. Seminar on strategies for the sound use of wood.* Poiana Brasov, Romania : UNECE–FAO – 10 p.

GALIK (Christopher), BAKER (Justin), GRINNELL (Joseph). 2009 – *Transaction costs and forest management carbon offset potential* – Durham : Duke University – 15 p.

GARDETTE (Yves-Marie) et LOCATELLI (Bruno). 2007 – *Les marchés du carbone forestier*. – Paris : Office national des forêts international et Centre international de recherche en agronomie pour le développement – 72 p.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT. 2003 – *Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie* – Kanagawa : Institute for Global Environmental Strategies – 584 p.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT. 2007 – *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport* – Genève : GIEC – 103 p.

GUIGON (Pierre), BELLASSEN (Valentin) et AMBROSI (Philippe). 2009 – *Voluntary Carbon Markets: What the Standards Say…* – Paris : Caisse des dépots et consignations – 46 p. (Mission climat working paper n° 2009-4).

HAMILTON (Khaterine), SJARDIN (Milo), SHAPIRO (Alison) et MARCELLO (Thomas). 2009 – *Fortifying the Foundation : State of the Voluntary Carbon Markets 2009* – Ecosystem marketplace and New Carbon Finance – 92 p.

HAMILTON (Khaterine), SJARDIN (Milo), PETERS STANLEY (Molly), MARCELLO (Thomas). 2010 – *Building Bridges: State of the Voluntary Carbon Markets 2010* – Ecosystem marketplace and Bloomberger New Energy Finance – 129 p.

HAMILTON (Khaterine), CHOKKALINGAM (Unna), and BENDANA (Maria). 2010 – *Taking root and branching out: State of the Forest Carbon Markets 2009* – Ecosystem marketplace – 71 p.

HAMON (Xavier), DUPRAZ (Christian), LIAGRE (Fabien). 2009 – *L'agroforesterie : outil de séquestration du carbone en agriculture*. – Montpellier : Agroof et INRA – 17 p.

HARMON (Mark) et SEXTON (Jay). 1996 – *Guidelines for measurements of woody detritus in forest ecosystems*. – Seattle : United States Long Term Ecological Research Publication – 42 p.

INSTITUT TECHNOLOGIQUE FORÊT CELLULOSE BOIS-CONSTRUCTION AMEUBLEMENT. 2008 – *Carbone stocké dans les produits bois - conception d'une méthodologie de quantification des variations de stock dans les produits bois répondant aux exigences du GIEC et application et application à l'année 2005 pour un rapportage volontaire dans le cadre de la Convention cadre des nations unies sur le changement climatique*. Paris : FCBA – 87 p.

INVENTARIO FORESTALE REGIONALE. 2000 – *Tavole dendrometriche regionali*. – Bologne : Ufficio Risorse forestali – 87 p.

JULLIAN (Arnaud), MISS (Fanny), PERRISSIN FABERT (Baptiste). 2009 – *Est-il possible de certifier des projets forestiers de séquestration du carbone en France sur les marchés volontaires?* – Paris : Agroparistech, École nationale du génie rural, des eaux et des forêts – 29 p.

KOLLMUSS (Anja), ZINK (Helge) et POLYCARP (Clifford). 2008 – *Making Sense of the Voluntary Carbon Market: A Comparison of Carbon Offset Standards* – Berlin : WWF – 119 p.

LANDMANN (Guy), GOSSELIN (Frédéric) et BONHÊME (Ingrid). 2009 – Bio2. *Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles*. – Paris : MEEDDM-Ecofor, 210 p.

LARRIEU (Laurent) et GONIN (Pierre). 2010 – L'indice de biodiversité potentielle ou IBP : un outil pratique au service de la biodiversité ordinaire des forêts. – *Forêt entreprise*, n°190, p. 52-57.

LECOCQ (Franck), MONTAGNÉ (Claire), NIEDZWIEDZ (Alexandra) et CAURLA (Sylvain). 2007 – *Convention cadre de recherche ONF – ENGREF : Puits de carbone forestiers, nouveaux marchés et implication pour la gestion forestière ; Convention de recherche particulière n° 3 : économie du carbone dans la filière* – Nancy : Laboratoire d'économie forestière – 46 p.

LECOCQ (Franck), SEYNAVE (Ingrid) et COUTURE (Stéphane). 2008 – *Convention cadre de recherche ONF – ENGREF : Puits de carbone forestiers, nouveaux marchés et implication pour la gestion forestière ; Convention de recherche particulière n° 2 : gestion forestière et carbone* – Nancy : Laboratoire d'économie forestière – 122 p.

LEMAIRE (Jean). 2008 – Estimer la potentialité de son taillis de châtaignier et y adapter les éclaircies – *Forêt entreprise*, n° 179, p. 14-17.

LEMAIRE (Jean). 2008 – Des outils pour cuber ses taillis de châtaignier – *Forêt entreprise*, n° 179, p. 25-28.

LEMAIRE (Jean). 2010 – *Le Chêne autrement* - Paris : Institut pour le développement forestier – 176 p.

LETURCQ (Philippe). 2010 – Bois énergie : une fausse « bonne solution » pour atténuer l'effet de serre – *Forêt entreprise*, n° 192, p. 32-28.

LOUSTAU (Denis). 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 CARBOFOR* – Programme GICC 2001 "Gestion des impacts du changement climatique", Convention Gip ECOFOR n° 3/2001 – 138 p.

MINISTÈRE DE L'ALIMENTATION, DE L'AGRICULTURE ET DE LA PÊCHE. 2010 – L'utilisation du territoire entre 2006 et 2009. – *Agreste Primeur*, n° 246.

MUUKKONEN (Petteri) et MÄKIPÄÄ (Raisa). 2006 – Biomass equations for European trees: addendum. *Silva Fennica* n° 40(4) p. 763-773.

NYS (Claude), LEGOUT (Arnaud), LECOINTE (Sandrine) et WALTER (Christian). 2008 – Incertitudes sur les stocks de carbone dans les forêts françaises. – *Forêt entreprise,* n° 181, p. 31-35.

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS et ÉTABLISSEMENT PUBLIC D'AMÉNAGEMENT NORD-ISÈRE. 2008 – *Présentation du projet « Puits de Carbone » du Nord Isère* – Paris : ONF – 12 p.

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS et VILLE DE NARBONNE. 2008 – *Dossier de presse du projet de puits de carbone biologique d'Aussiere Farine* – Paris : ONF – 11 p.

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS et PRINCIPAUTÉ DE MONACO. 2007 – *Dossier de presse du projet de puits de carbone de la principauté de Monaco*– Paris : ONF – 1 p.

PEARSON (Timothy), WALKER (Sarah) and BROWN (Sandra). 2005 – *Sourcebook for Land use, land-use change and forestry projects* – Winrock international – 57 p.

PETERSEN (Ann Kristin)**,** SOLBERG (Birger). 2005 – Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden. *Forest Policy and Economics*, vol. VII, n°3, p. 249-259.

PICARD (Olivier). 2006 – Crédits carbone : que fait la forêt ? – *Forêt entreprise,* n° 168, p.11-51.

PICARD (Olivier), ROBERT (Nicolas), RUBIO (Marianne) et TOPPAN (Eric). 2008 – Forêt et carbone : les forestiers s'impliquent – *Rendez-vous techniques*, n° 20, p. 44-47.

PONCELET (Jacques). 2008 – L'âge d'exploitabilité du douglas **–** *La forêt privée,* n° 300, p.38-43.

PRIEUR (Anne). 2004 – *Les ressources forestières : produits du bois, usages énergétiques, capture et stockage du carbone*. – Bordeaux : Université de Bordeaux I – 183 p. (Thèse de doctorat).

REVERCHON (Fabien). 2006 – *Fixation de carbone par des plantations forestières provençales et application à la lutte contre l'effet de serre en région PACA.* – Nancy : École nationale du génie rural, des eaux et des forêts – 69 p. (Mémoire de fin d'étude de la Formation des ingénieurs forestiers).

ROBERT (Nicolas). 2008 - *Influence de la gestion forestière sur les stocks de carbone en forêt et dans les produits : Rapport final et suites potentielles* – Nancy : Institut national de la recherche agronomique et Agroparistech – 11 p.

SABATIER-TARRAGO (Catherine). 1989 – *Production de taillis de châtaignier en relation avec les caractéristiques stationnelles* – Paris : Université de Paris-Sud, centre d'Orsay – 230 p. (Thèse de doctorat).

SAINT-ANDRÉ (Laurent), VALLET (Patrick), PIGNARD (Gérôme), DUPOUEY (Jean Luc), COLIN (Antoine), LOUSTAU (Denis), LE BAS (Christine), MEREDIEU (Céline), CARAGLIO (Yves), PORTÉ (Annabel), HAMZA (Nabila), CAZIN (Antoine), NOUVELLON (Antoine), DHÔTE (Jean-François). 2010 – Estimating carbon stocks in forest stands: methodological developments. – Dans : *Forests, Carbon Cycle and Climate Change.* Versailles : Edition Quae, p. 79-100 (Collection Update sciences et technologies).

SCHÜTZ (Jean-Philippe). 2008 – *Position de Pro Silva sur la bonne gestion du carbone* – Pro Silva Europe – 5 p.

SCHNEIDER (Lambert). 2007 – *Is the CDM fulfilling its environmental and sustainable development objectives? An evaluation of the CDM and options for improvement* – Berlin : Öko-Institut – 45 p.

SELMANI (Youssef). 1992 – *Analyse des flux physiques de bois à l'intérieur de la filière bois*. – Nancy : École nationale du génie rural, des eaux et des forêts – 241 p. (Thèse de doctorat).

TAVERNA (Ruedi), HOFER (Peter), WERNER (Frank), KAUFMANN (Edgar), THÜRIG (Ester). 2007 – *The CO2 effects of the Swiss Forestry and Timber Industry* – Bern : Federal office for the Environment – 102 p.

TOPPAN (Éric). 2006 – Stockage de carbone : quelles opportunités pour les forestiers ? – *Forêts de France*, n° 492, p. 18-23.

UNITED NATION FRAMEWORK CONVENTION FOR CLIMATE CHANGE. 2008 – *Approved consolidated afforestation and reforestation baseline and monitoring methodology : AR-ACM0001* – 36 p. (version 04).

VALLAURI (Daniel), ANDRÉ (Jean) et BLONDEL (Jacques). 2003 – Le bois mort, une lacune des forêts gérées – *Revue forestière française*, vol. 55, n° 6, p. 99-112.

VALLET (Patrick). 2005 – *Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction « puits de carbone » des peuplements forestiers. Modélisation et simulation à l'échelle de la parcelle.* – Nancy : École nationale du génie rural, des eaux et des forêts – 190 p. (Thèse de doctorat).

VALLET (Patrick), DHÔTE (Jean-François), LE MOGUÉDEC (Gilles), RAVART (Michel), PIGNARD (Gérôme). 2006 – Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France – *Forest ecology and management*, vol. 229, n° 1-3, p. 98-110.

VALLET (Patrick), DHÔTE (Jean-François). 2008 – Impact de la gestion sylvicole sur le stockage de carbone en forêt : le cas du hêtre. – *Forêt entreprise*, n° 168, p.23-25.

VOLUNTARY CARBON STANDARD. 2008 – *Guidance for Agriculture, Forestry and Other Land Use Projects* – 37 p.

VOLUNTARY CARBON STANDARD. 2008 – *Tool for Agriculture, Forestry and Other Land Use Methodological Issues* – 10 p.

VOLUNTARY CARBON STANDARD. 2010 – *Methodology for Improved Forest Management through Extension of Rotation Age: VM0003* – 47 p.

ZIANIS (Dimitris), MUUKKONEN (Petteri), MÄKIPÄÄ (Raisa) et MENCUCCINI (Maurizio). 2005. – Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. – *Silva Fennica Monographs* n° 4. 63 p.

Liste des contacts

Nom	Organisme	Fonction	Courriel	Téléphone
Valentin Bellassen	CDC Climat Recherche	Chargé de mission "secteur forestier et marchés volontaires"	valentin.bellassen @caissedesdepots.fr	01 58 50 19 75
Luc Bouvarel	Forestiers privés de France	Directeur	luc.bouvarel @foretpriveefrancaise.fr	01 47 20 36 32
Loïc Casset	CRPF Rhône-Alpes	Technicien Isère	loic.casset@crpf.fr	04 75 02 10 67
Guillaume Cousseau	GSA Aisne	Ingénieur commercialisation	contact@foret-aisne.com	03 23 23 35 06
Alain Davase		Propriétaire forestier - administrateur syndicat Dordogne		06 85 33 00 77
Mariana Deheza	CDC Climat Recherche	Chargée d'étude	mariana.deheza @caissedesdepots.fr	01 58 50 99 85
Jean François Dejoux	CNRS-CESBIO	Chercheur	jean-francois.dejoux @cesbio.cnes.fr	05 61 55 85 97
Christophe Drénou	IDF	Responsable IDF Toulouse	christophe.drenou@cnppf.fr	05 61 75 45 03
Sébastien Drouinau	CRPF Aquitaine	Ingénieur économie	sebastien.drouineau@crpf.fr	05.56.01.54.74
Mathieu Fortin	INRA	Chercheur (interface INRA-France forêt)	mfortin@nancy.inra.fr	03 83 39 73 02
Florianne François	Société Forestière CDC	Stagiaire	florianne.francois@gmail.com	01.40.39.81.20
Henri Frisch	La forêt pour témoin	Président	henri.frisch@noos.fr	01 46 24 38 45
Alexandre Guerrier	CRPF Ile de France Centre	Technicien Ile de France	alexandre.guerrier@crpf.fr	01 39 54 46 71
Jean Lemaire	IDF	Ingénieur recherche et développement	jean.lemaire@cnppf.fr	02 38 71 95 53
Yves Lesniewski	LERFOB	Stagiaire bilan carbone	yves.lesniewski @engref.agroparistech.fr	01 42 75 90 00
Frédéric Mothe	LERFOB	Chercheur	mothe@nancy.inra.fr	03 83 39 41 45
Yann Mozziconacci	CRPF Bourgogne	Technicien Nièvre	yann.mozziconacci@crpf.fr	03 86 71 93 55
Antoine Mugnier	FRM	Ingénieur chargé d'étude	amugnier@frm-France.com	04 67 20 08 09
Alexandra Niedzwiedz	LEF	Gestionnaire de l'Observatoire Economique du LEF	niedzwiedz @nancy-engref.inra.fr	03 83 39 68 59
Jean Marc Ottorini	INRA	Chercheur	ottorini@nancy.inra.fr	03 83 39 40 46
Gilles Pichard	CRPF Bretagne	Ingénieur responsable antenne Ile et Vilaine	gilles.pichard@crpf.fr	02 97 62 60 95
Fabien Reverchon	COFOR 34	Chargé de mission bois energie	fabien.reverchon @communesforestieres.org	04 67 47 04 92
Philippe Riou-Nivert	IDF	Ingénieur recherche et développement	philippe.riounivert@cnppf.fr	01 45 94 32 57

Michael Rivoire	LERFOB	Doctorant	michael.rivoire@gmail.com	03 83 39 40 30
Nicolas Robert	IFN	Doctorant	nicolas.robert @nancy-engref.inra.fr	
Marianne Rubio	ONF	Chargée de mission climat	marianne.rubio@onf.fr	01 40 19 59 03
Éric Sevrin	CRPF Ile de France Centre	Directeur adjoint	eric.sevrin@crpf.fr	02 38 53 07 91
Gilbert Tisserand		Gérant GF Gaudeix (87)	tisserand.gilbert@orange.fr	06 87 52 86 81
Patrick Vallet	Cemagref	Chercheur	patrick.vallet@cemagref.fr	02 38 95 03 54
Bruno Vanstaevel	CRPF Bourgogne	Ingénieur responsable antenne Nièvre	bruno.vanstaevel@crpf.fr	03 86 71 93 55
Estelle Vial	FCBA	Ingénieur environnement et développement durable	estelle.vial@fcba.fr	01 40 19 49 53

Table des annexes

Annexe 1. Méthodologie d'inventaire de terrain pour l'estimation des stocks de carbone 65
Annexe 2. Répartition des sites pilote France forêt selon les modes de gestion (forêt privée) 73
Annexe 3. Présentation didactique de l'action sur les sites 77
Annexe 4. Fiche du site pilote n° 17 : Futaie irrégulière de Douglas dans le Morvan 83
Annexe 5. Fiche du site pilote n° 6 : Plantation de chênes en Dordogne 91
Annexe 6. Comparaison de deux méthodes de quantification de la prolongation du stockage dans les produits bois 95
Annexe 7. Plaquette de présentation du club carbone forêt-bois 99
Annexe 8. Présentation orale réalisée à l'AG de Forestiers privés de France le 10 juin 2010 105

Annexe 1.
Méthodologie d'inventaire de terrain pour l'estimation des stocks de carbone

Méthodologie d'inventaire carbone

Le but de cette méthodologie est de définir le protocole d'inventaire qui sera appliqué sur les sites pilotes carbone de la forêt privée. Cet inventaire doit permettre de déterminer la quantité de carbone stockée dans les compartiments « arbre vivant », « arbre mort sur pied » et « bois mort au sol ».

Cette méthodologie a été établie suivant les recommandations du guide de Pearson et al. (2005) et adaptée au cas des forêts françaises suivant l'exemple des sites pilotes France forêt.

1. Périmètre du site

Le contour de la parcelle identifiée comme site pilote sera relevé au GPS. Ce relevé permettra d'établir des cartes du site et de connaitre la surface précise de ce dernier.

2. Protocole d'échantillonnage

Une stratification avec un échantillonnage différent pour chaque strate pourrait être adoptée, mais étant donné la petite taille des parcelles inventoriées et leur homogénéité, une seule strate sera considérée. Il sera établi un inventaire par placettes permanentes, lorsque le propriétaire autorise leur mise en place (voir paragraphe 2.4.), par placettes temporaires sinon.

- *Taille et forme des placettes*

Les placettes seront de forme circulaire. La taille des placettes est calculée de façon à ce qu'il y ait toujours au minimum 10 arbres dans la placette durant toute la révolution du peuplement. Ainsi pour un peuplement qui atteindrait 330 tiges/ha à la fin d'une révolution, il faut prévoir des placettes de rayon 10 m pour satisfaire ce critère. Il peut être également intéressant d'établir différentes placettes concentriques au même endroit suivant les catégories de diamètre mesurées. La mise en place de placettes concentriques devra être décidée au cas par cas suivant la structure du peuplement. On veillera à noter à chaque fois le rayon de la placette mesurée.

- *Nombre de placettes*

Le nombre de placettes à mettre en place est calculé selon la formule :

$$n = \frac{(N * s)^2}{\frac{N^2 * E^2}{t^2} + N * s^2}$$

Où :

- n est le nombre de placettes à mettre en place
- N est le ratio entre la surface totale de la parcelle et la surface d'une placette.
- s est l'écart type qui doit théoriquement être déterminé lors d'un pré-inventaire. Faute de temps, ce pré-inventaire n'est pas envisageable et on estime donc s à partir de la moyenne du stock de carbone forestier en France (71 tC/ha d'après Loustau *et al.*, 2004) et les coefficients de variation généralement constatés en en forêt (20-30% en futaie régulière et 40-60% en futaie irrégulière).
- E est l'erreur que l'on s'autorise, c'est-à-dire la moyenne estimée du stock de carbone par hectare multiplié par le niveau de précision choisi. Le stock moyen choisi est la moyenne nationale estimée par Loustau *et al.* 2004 lors du projet Carbofor : 71 tC/ha.
- t est la valeur de la variable de student au seuil de confiance choisi (ici 5%). Sa valeur arrondie est de 2.

Par exemple, pour une parcelle de 12 ha en futaie régulière de douglas, on devra établir 9 placettes de rayon 10 m pour avoir une estimation à 20% près du stock de carbone, en considérant un coefficient de variation de 30%.
Le nombre de placettes mises en place pourra être légèrement supérieur afin de garantir une bonne précision des résultats.

- *Localisation des placettes*

Un échantillonnage systématique sera mis en place dans les cas où une cartographie du site est disponible. Un maillage carré sera appliqué à la parcelle, donnant la localisation des placettes.

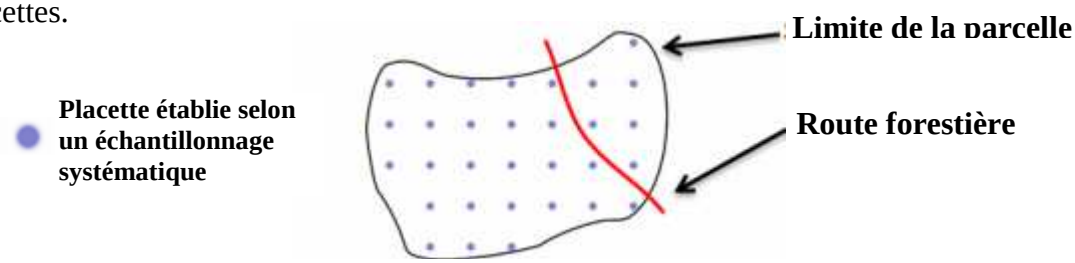


Figure 1a. – Exemple d'échantillonage systématique

Cependant, un échantillonnage systématique est parfois difficilement envisageable compte tenu du peu d'informations disponibles actuellement sur les sites (peu ou pas de carte). Dans ce cas, l'emplacement des placettes sera choisi aléatoirement de façon à ce qu'elles se répartissent sur toute la surface de la parcelle (échantillonnage aléatoire).

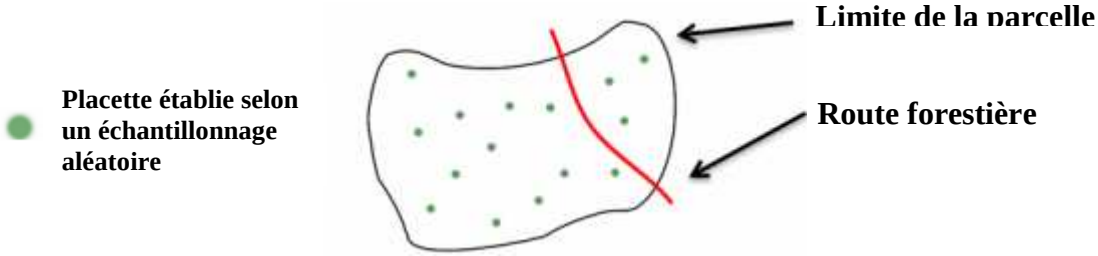


Figure 1b. – Exemple d'échantillonage aléatoire

- *Matérialisation des placettes permanentes*

Dans le cas où les placettes établies sont permanentes, en plus du relevé GPS du point central de la placette, un piquet en bois peint en blanc sera placé au centre de la placette et une tige métallique sera implantée dans le sol. Les éléments remarquables se trouvant sur ou à proximité de la placette pourront être notés et serviront ainsi de points de repère pour ultérieurement localiser le centre de la placette. En outre, on veillera à noter les directions et distances de cheminement qui pourront aider ultérieurement à retrouver la placette (par exemple azimut et distance depuis une place de dépôt).

3. Correction de pente

Afin que les placettes aient toutes la même surface projetée horizontalement, il faut établir une correction de pente si celles-ci sont établies sur un terrain dont la pente est supérieure à 10 %. Le rayon des placettes de pente supérieure à 10 % sera recalculé selon la formule :

$$r_{pente} = C_f * r$$

Où
-r_{pente} est le rayon de la placette située en terrain pentu
- r est le rayon normal des placettes en terrain plat

- C_f est le coefficient de correction, calculé suivant :

pente (%)	Cf	pente (%)	Cf	pente (%)	Cf
10-17	1,01	37-39	1,07	52-53	1,13
18-22	1,02	40-42	1,08	54-55	1,14
23-26	1,03	43-44	1,09	56-57	1,15
27-30	1,04	45-47	1,1	58-59	1,16
31-33	1,05	48-49	1,11	60-61	1,17
34-36	1,06	50-51	1,12		

Tableau 1. – Coefficients de correction de pente

4. Inventaire de terrain

Lors de l'inventaire, les variables suivantes seront relevées **sur chaque placette** :

- les coordonnées GPS du point central
- la pente et l'exposition

- *Inventaire des arbres vivants*

Pour chaque arbre vivant ayant un diamètre à 1,30 m de plus de 7,5 cm seront relevés :
- l'essence
- le diamètre à 1,30 m

Sur chaque placette, on mesurera la hauteur totale d'un arbre par classe de diamètre et par essence.

Concernant les techniques de mesure des diamètres à 1,30 m, les opérateurs de terrain suivront les recommandations décrites en détail dans le guide « Sourcebook for LULUCF projects » de Pearson *et al.* (2005) et résumées dans le schéma suivant :

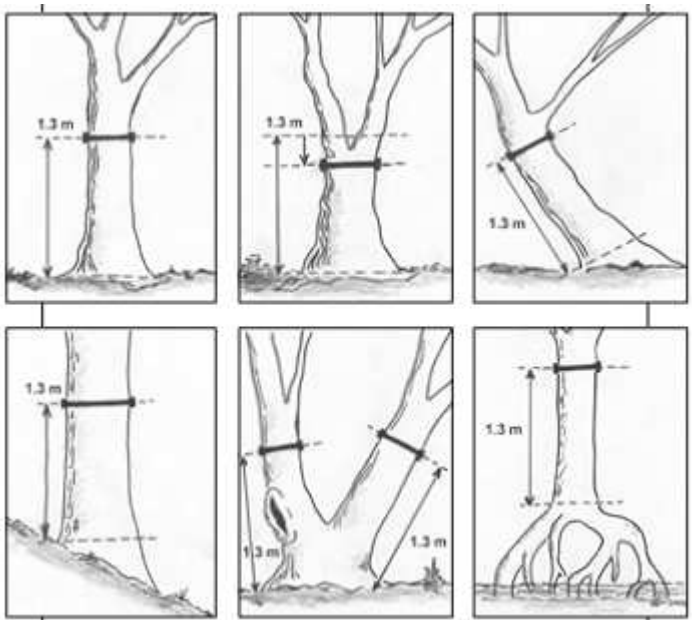


Figure 2. – Recommandations pour la mesure de diamètres à 1,30 m. Source : Pearson et al. (2005)

- *Inventaire des arbres morts sur pied*

Ils seront inventoriés selon la même méthode que les arbres vivants, et leurs classes de décomposition seront évaluées selon les catégories suivantes :

- Catégorie 1 : arbre mort avec toutes ses branches d'aspect semblable à un arbre vivant
- Catégorie 2 : arbre ayant perdu ses branches fines
- Catégorie 3 : arbre sur lequel seules les grosses branches restent
- Catégorie 4 : tronc seul. Pour les arbres de cette catégorie, le diamètre de l'extrémité cassée sera estimé à l'aide d'un relascope de Bitterlich.

Cette estimation du stade de décomposition des arbres morts sur pied permettra une évaluation grossière de leur volume et donc de leur biomasse.

Voici un exemple de fiche de relevé terrain pour les arbres sur pied :

INVENTAIRE CARBONE

Site pilote: **Placette n°:**
Coordonnées GPS (X): **Coordonnées GPS (Y):**
Rayon de la placette (m):
Pente (%) : **Exposition (°) :**
Opérateur: **Date:**

Arbres avec D130 ≥ 7,5 cm

ID arbre	Essence	Catégorie si bois mort (1)	D130 (cm)	H (m) (2)	Remarques
1	*douglas*		*42*	*28*	
2	*chêne*	*4*	*25*	*20*	*Dhaut=15 cm*

- *Inventaire du bois mort au sol*

Le bois mort au sol sera inventorié sur chaque placette grâce à la méthode de la « ligne d'intersection » (HARMON et SEXTON, 1996). Deux transects perpendiculaires de 50 m seront établis depuis le centre de la placette. Sur chacun de ceux-ci, on comptabilise chaque pièce de bois mort de plus de 10 cm de diamètre rencontrée (si le diamètre est inférieur, on considère que le bois fait partie du compartiment « litière » qui n'est pas pris en compte ici). On note le diamètre de chaque pièce de bois mort rencontrée, ainsi que son état de décomposition selon les 3 classes : sain, intermédiaire ou pourri. Pour déterminer le stade de décomposition, on utilise la « méthode de la machette » comme recommandé par le GIEC (2003). Le volume par hectare de bois mort au sol est calculé pour chacun des stades de décomposition défini ci-dessus grâce à la formule suivante :

$$\text{Volume } (m^3/ha) = \Pi^2 * \frac{(d_1^{\,2} + d_2^{\,2} + ... d_n^{\,2})}{8L}$$

Où

- d_i est le diamètre de la pièce de bois mort i
- n est le nombre total de pièces de bois mort rencontrées au sol sur le transect
- L est la longueur du transect (ici deux fois 50 m soit 100 m)

Le volume de bois mort à l'hectare est ensuite converti en biomasse par hectare selon la densité de chacune des classes de décomposition, puis en tonne de carbone par hectare.

5. Matériel nécessaire

Le matériel suivant est nécessaire :

Dénomination	Usage	Quantité nécessaire
GPS	établir les limites du site et localiser le centre des placettes	1
télémètre	mesurer le rayon des placettes	1
compas forestier ou mètre ruban	mesurer le diamètre des arbres à 1,30m	2
Outil de mesure des hauteurs	mesurer les hauteurs des arbres	1
relascope de Bitterlich	mesurer le diamètre en hauteur des arbres morts de catégorie 4	1
clinomètre	mesurer la pente des placettes	1
décamètre de 50m	établir les transect de mesure du bois mort au sol	1
bombes de peinture	matérialiser les arbres limites de la placette	2
masse	enfoncer les piquets pour les placettes permanentes	1
piquets en bois	matérialiser le centre des placettes	30

Tableau 2. – Matériel nécessaire pour l'inventaire de terrain

Annexe 2.
Répartition des sites pilote France forêt selon les modes de gestion (forêt privée)

		Type de peuplement						
		Futaie régulière		Taillis			Futaie irrégulière	
		Feuillus seuls	Résineux seuls	Simples	Sous futaie	A courte rotation	A base de feuillus	A base de résineux
Origine du peuplement	Plantation après coupe rase	n°4 Peuplier (Midi Pyrénées)	n°7 Douglas (Limousin)					n°17 Douglas (Bourgogne)
	Régénération naturelle	n°13 Hêtre (Lorraine)		n°11 Châtaignier (Ile de France)	n°10 Chêne et châtaignier (Ile de France)		n°14 Chêne (Bourgogne)	n°15 et 16 Sapin (Auvergne)
	Plantation d'enrichissement						n°12 Feuillus divers (Picardie)	
	Plantation après tempête	n°6 Chêne (Aquitaine)	n°5 Pin Maritime (Aquitaine)					
	Plantation sur terres pâturées	n°9 Chêne (Pays de la Loire)	n°1 Cèdre et pins (PACA)			n°3 Eucalyptus (Midi Pyrénées)		
	Plantation sur terres cultivées		n°8 Pin laricio (Poitou Charentes)				n°2 Mélanges binaires (PACA)	

Annexe 3.
Présentation didactique de l'action sur les sites

FORESTIERS PRIVES DE FRANCE
Fédération nationale des Syndicats de forestiers privés
6 rue La Trémoille
75008 PARIS
Tel : 01 47 20 36 32 – Fax : 01 47 23 38 58

CENTRE NATIONAL PROFESSIONNEL DE LA PROPRIETE FORESTIERE
47 rue de Chaillot
75116 PARIS
Tel : 01 47 20 68 15 – Fax : 01 47 23 49 20

Forêt et carbone : les forestiers s'impliquent

La forêt française séquestre l'équivalent de plus de 13% des émissions de gaz à effet de serre nationales tous les ans. Mais au-delà de la séquestration passive, le forestier peut prendre des initiatives pour optimiser la contribution d'une forêt gérée durablement à l'atténuation du changement climatique. Notre objectif est de faire reconnaître ce rôle actif de la forêt par la participation aux mécanismes de marché du CO_2.
La mise en place d'un réseau de sites pilotes carbone sur le territoire français a pour but d'apporter des éléments concrets pour mieux intégrer la forêt aux mécanismes de lutte contre le changement climatique.

Le contexte : les forestiers à l'initiative d'un dispositif de démonstration de sites pilotes carbone

Le rôle joué par la forêt dans la limitation de l'effet de serre -préoccupation internationale majeure- est aujourd'hui communément admis.

Par le mécanisme de la photosynthèse, les **arbres capturent le CO2** atmosphérique qui se retrouve séquestré sous forme de carbone dans les racines, le tronc, les branches et les feuilles. Lorsque la forêt est exploitée, la séquestration du carbone est prolongée dans **les produits bois** et la régénération de la forêt permet de capturer de nouveau du carbone. En outre, le matériau bois remplaçant généralement des matériaux ayant la même fonction mais plus énergivores (plastique, béton, aluminium…), sa production et son utilisation permettent par **effet de substitution** d'éviter l'émission de gaz à effet de serre.

La forêt a donc une triple action sur l'atténuation de l'effet de serre : elle capture le CO2 atmosphérique, elle le séquestre dans la biomasse et dans les produits bois qui en sont issus et elle permet d'éviter des émissions par effet de substitution.

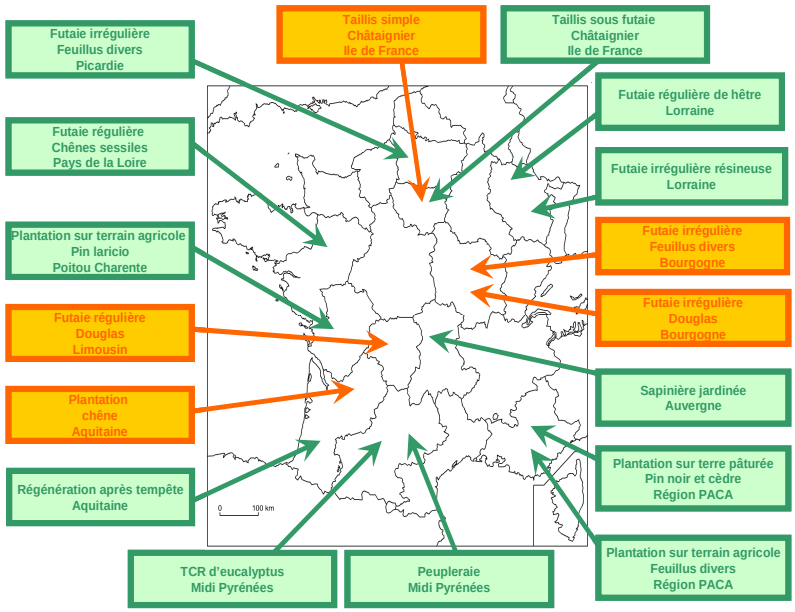
Les forêts françaises gérées durablement constituent ainsi un véritable « outil » de lutte contre l'effet de serre. Par leurs décisions de gestion, **les forestiers agissent sur le stockage du carbone** en forêt et dans les produits bois. Ils disposent, du fait des différents choix de sylvicultures possibles, de moyens d'agir sur les quantités de carbone stockées et sur la qualité des produits exploités.

Dans ce contexte, l'Association France Forêts, qui regroupe les propriétaires forestiers publics et privés, s'appuie sur des sites de démonstration représentatifs de la forêt française : elle a mis en place une trentaine de sites forestiers (17 en forêt privée) dont l'objectif est de servir d'exemple de gestion pour améliorer le bilan carbone. Ces différents projets permettent de disposer d'un éventail **de sites de démonstration en forêt française**, chacun relevant d'une problématique spécifique de gestion sylvicole. Ce dispositif permet ainsi d'expérimenter et de comparer des évolutions de gestion et de choix techniques orientés vers l'amélioration du bilan carbone.

Ces projets s'inscrivent dans le respect de la conservation de la biodiversité et de la gestion durable du patrimoine naturel.

Le choix des sites

Les sites de démonstration concernent les types de gestion **les plus représentatifs** tant au niveau du type de peuplement (futaie régulière ou irrégulière, taillis simples ou taillis sous-futaie) qu'au niveau de l'origine du peuplement : régénération naturelle, plantation après coupe rase, boisement de terre agricole… Un tableau présente la répartition des sites en annexe selon les types de gestion en annexe 1. Les sites ont également été choisis dans le but d'y étudier **les différents modes d'actions du forestier** (voir l'encadré « la boite à outil du forestier »).



Localisation des sites de démonstration. En orange : sites pour lequel un bilan carbone existe.

Cinq façons de lutter contre le changement climatique: la boîte à outil du forestier

1. Augmenter les surfaces boisées

L'impact du boisement sur le stock de carbone total par unité de surface est très nettement positif en raison du stock de carbone de la biomasse très élevé en forêt par rapport aux prairies et aux cultures.

2. Diminuer les risques de catastrophes naturelles (incendie, chablis…)

Dès à présent, les forêts européennes subissent les conséquences des modifications du climat, notamment sous la forme de la multiplication des évènements « exceptionnels » : tempêtes de 1999, 2005, 2009, sécheresse et canicule de 2003... C'est pourquoi il est important d'optimiser la gestion forestière pour limiter les risques de perte de stock et augmenter la résilience après de tels événements.

3. Identifier les pratiques sylvicoles optimisant le bilan carbone en forêt

Le choix de l'essence et du traitement peuvent être déterminant sur le stock total de carbone dans l'écosystème, et en particulier sur le stock de carbone du sol. Peu d'études sont disponibles à ce sujet, mais des actions telles que l'allongement de la durée de révolution ou le changement de structure d'un taillis vers une futaie conduisent à une augmentation du stock contenu dans la biomasse en forêt.

4. Adapter les peuplements au changement climatique

Dans la mesure des connaissances disponibles, le forestier doit tenir compte pour son choix d'essences et de traitements des changements climatiques constatés et prévus, afin d'assurer, dans une vision à long terme, une gestion durable et optimale du patrimoine forestier.

5. Prolonger la séquestration dans des produits à durée de vie importante et se substituant à des matériaux énergivores

Une récente étude réalisée en Suisse a montré qu'il est plus intéressant, en terme de bilan « carbone » à l'échelle nationale, d'exploiter la forêt de façon durable et d'utiliser le bois produit, que de laisser la forêt évoluer sans intervention du forestier. La production de bois d'œuvre de qualité utilisé pour former des produits à durée de vie importante permet d'améliorer le bilan. Ce bilan est par ailleurs largement amélioré lorsque le bois se substitue à des matières premières ou des matériaux émetteurs de quantités importantes de gaz à effet de serre.

Les objectifs du réseau de sites-pilotes

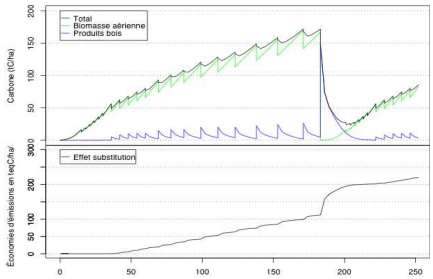
- Améliorer **la connaissance du bilan carbone** de la gestion forestière, en terme quantitatif et économique, à l'échelle d'une propriété forestière et identifier les leviers d'action du gestionnaire sur le bilan carbone.
- Identifier les **scénarios sylvicoles qui optimisent le bilan carbone** en forêt et quantifier l'impact des sylvicultures préventives (prévention des incendies de forêts, etc.).
- Mettre au point des **méthodes** de mesure simples et rigoureuses du carbone forestier.
- Disposer d'exemples concrets de bilan carbone afin d'**appuyer la démarche de mise en place de projets de compensation carbone** par la gestion forestière en France.

Les autres actions menées par la forêt privée pour la valorisation du carbone forestier

Les acteurs de la forêt privés française sont parties prenantes d'autres actions complémentaires à la mise en place des sites de démonstration.

1. Poste d'interface France-forêt/INRA

Afin de prévoir la séquestration de carbone par les écosystèmes forestiers selon différentes hypothèses, le recours à la **modélisation** est nécessaire. Cette mission a été confiée au **Laboratoire d'étude des ressources forêt bois** (Lerfob, INRA-Agroparistech Engref). L'objet du travail est d'**élaborer un outil de simulation du stockage de carbone** en forêt et de limitation des rejets de CO2 en fonction de scénarios sylvicoles et d'utilisation des produits bois. Il consiste en l'articulation de modèles existants (parmi lesquels des modèles de croissance et d'utilisation des bois) sur la plateforme Capsis.



Exemple de simulation de séquestration avec Capsis

2. Création du club carbone

Le club carbone a pour but de mutualiser les moyens et les retours d'expériences de l'ensemble des acteurs de la filière forêt bois française afin de **mettre en place les conditions pratiques nécessaires à la valorisation du stockage de carbone en forêt et dans les produits bois**. Forestier privés de France et le CNPF font parti des membres fondateurs de ce club. Les résultats issus du dispositif de sites pilotes apporteront des éléments concrets aux actions du club.

3. Action « Valorisation du carbone séquestré par la forêt privée »

Dans le but de fédérer les initiatives de valorisation du carbone en forêt privée en proposant un cadre national global, Forestiers privés de France crée une organisation offrant la possibilité aux propriétaires privés de **mettre en place des projets de séquestration de carbone financés par la voie du mécénat**. Cette action est complémentaire aux actions du club carbone : elle facilitera la mise en place de projets labellisés dans le cadre du club et permettra la certification des projets qu'elle soutient lorsque les outils seront disponibles.

Programme détaillé de l’étude pour les sites en forêt privée

Année	Étapes	Description	Réalisation
2007-2008	**1**	• Mise en place du réseau de sites pilotes (cahier des charges, recherche de correspondants, sélection des sites).	**X**
2008-2009	**2**	• Récolte de données historiques sur les sites (opérations sylvicoles, passages en coupe, perturbations…) et entretiens avec les gestionnaires et les propriétaires.	**X**
2010-2011	**3**	• Mise au point de méthodes de calcul de bilan carbone à l'échelle d'une parcelle forestière : 1. modélisation de la séquestration des peuplements (en lien avec le poste d'interface INRA/France forêt) ; 2. quantification des émissions liées aux activités sylvicoles ; 3. quantification de la séquestration dans les produits bois issus des peuplements et des émissions évitées par effet de substitution. • Mise au point d'un protocole de suivi par inventaire des quantités de carbone dans les peuplements forestiers. • Récolte de données concernant la valorisation des bois et leur répartition en catégories de produits. • Mesure par inventaire des stocks de carbone sur les sites.	**pour 5 sites sur 17**
2010-2011	**4**	• Lancement de l’opération « Valorisation du carbone séquestré par la forêt" et utilisation des résultats issus des travaux sur les sites pour appuyer cette action. • Utilisation des résultats obtenus sur les sites comme appui concret pour les actions entreprises par le Club carbone.	
2011-2012	**5**	• Publications des résultats, métrologie et méthodes de calculs du bilan, formations, rapports, sensibilisation des propriétaires.	

Annexe 4.
Fiche du site pilote n° 17 : Futaie irrégulière de Douglas dans le Morvan

Fiche du site pilote n° 17 : Futaie irrégulière de Douglas dans le Morvan

1. Description du site

1.1. Renseignements généraux

Ce site est situé au sein d'une propriété de 52,3 ha au cœur du Morvan et dans le département de la Nièvre (58). Ce site a été choisi car il fait partie par ailleurs du réseau de dispositifs de suivi de l'Association Futaie Irrégulière (AFI). Sa superficie est de 10,63 ha. Les correspondants pour ce site sont MM. Bruno Vanstaevel et Yann Mozziconacci du CRPF Bourgogne.

1.2. Localisation

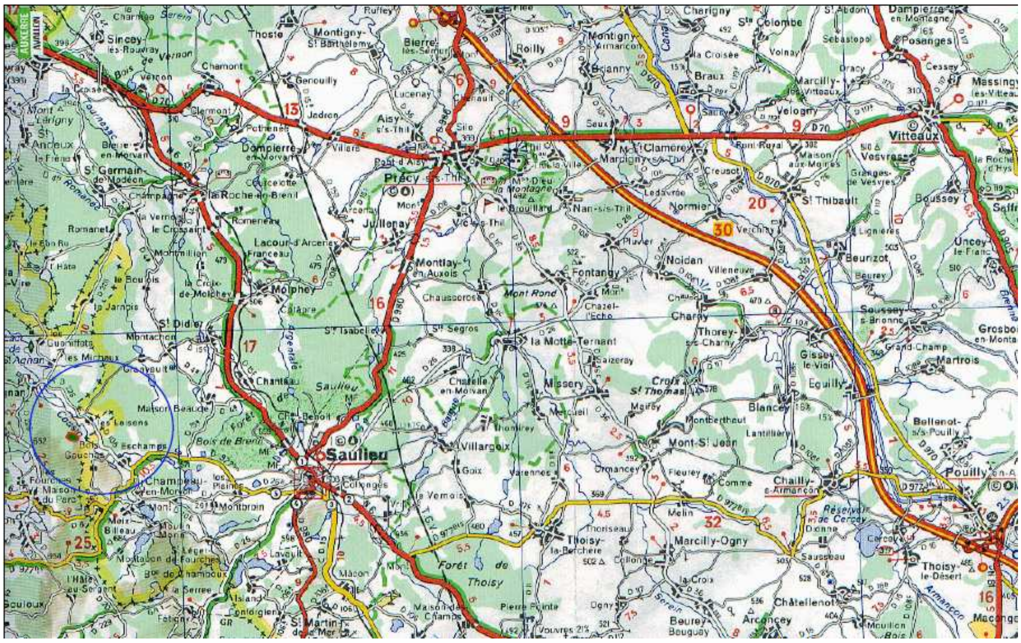


Figure 1. – Plan de situation du site 17. Source : AFI

1.3. Données stationnelles (d'après l'AFI)

Précipitations annuelles moyennes : 900 mm (216 mm en juin, juillet, août).
Température moyenne annuelle : 9 ° C. > 100 jours de gel et 20 jours de neige par an.
Altitude : 560 à 600 m.
Position topographique : Versant, orienté du Nord à l'Est. Pente moyenne de 20 %, localement plus.
Géologie : Lentille de granite, entourée de granulite de “ La Pierre qui Vire ”.
Pédologie : Sol sableux acide sur arène granitique (cf. détails ci-après).
Végétation : Acidicline à acidiphile.
Peuplement forestier : Peuplement de douglas issu de plantation avec épicéa, grandis et sapin.

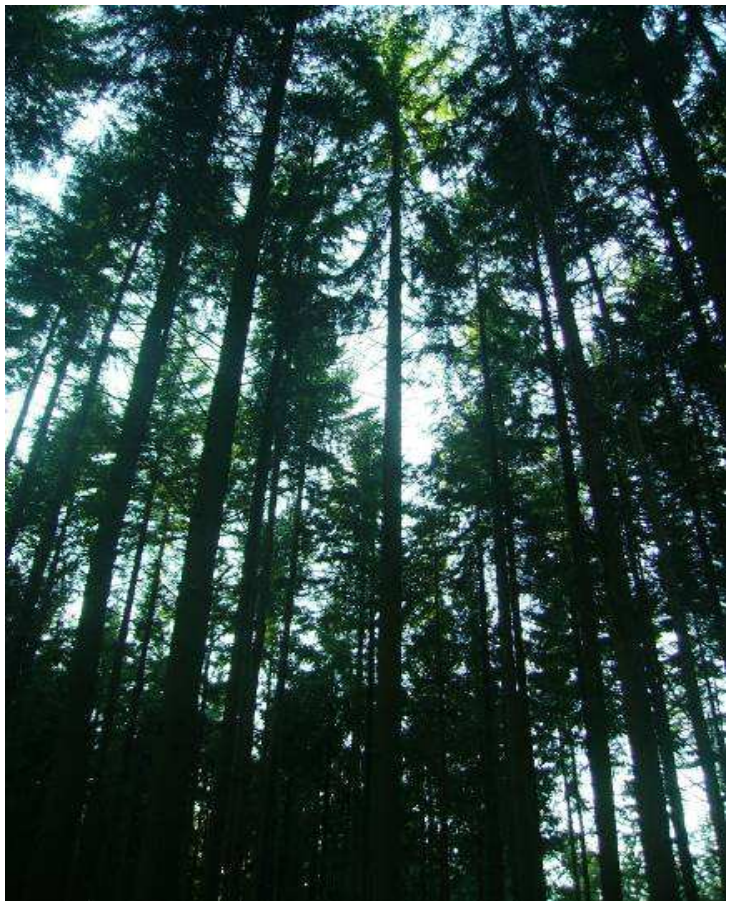


Figure 2. – Douglas du site pilote n°17. Photo : S. Martel

2. Bilan carbone historique

2.1. Émissions liées aux activités forestières

Les données historiques du site recueillies par l'AFI et le CRPF Bourgogne ont permis de reconstituer le bilan carbone des 50 dernières années. Les émissions liées aux activités forestières sont calculées à partir des facteurs d'émission de Prieur (2004), selon la méthode décrite en annexe 1.

Année	**Type d'intervention**	**Détails techniques**	**Volume prélevé** (m3/ha)	**Emissions liées à l'opération** (tC/ha)
1959	plantation	80% Douglas et 20% en Epicéa, Sapin pectiné et Grandis, densité de 1600 tiges/ha	-	0,22
1960-1965	dégagement et regarnis	opérations manuelles	-	-
-	élagage de toutes les tiges à 2,5 m	opération manuelle	-	-
-	elagage de 250 tiges/ha à 5m	opération manuelle	-	-
1983	première éclaircie	éclaircie systématique (1 ligne sur 6)	6,6	0,02
1987	éclaircie	160 tiges/ha prélevées	43	0,10
1991	éclaircie	54 tiges/ha prélevées	21,6	0,05
1995	éclaircie	36 tiges/ha prélevées	42,5	0,10
1999	éclaircie et vente de chablis		34,1	0,08
2002	éclaircie et vente de chablis		29,1	0,07
2004	éclaicie	sauf partie marteloscope	40,6	0,09
2005	éclaicie	partie Marteloscope (1 ha, 49 tiges)	7,8	0,02

Tableau 1. – Bilan carbone des interventions sylvicoles

Même si les estimations des gaz à effet de serre rejetés par les activités forestières mériteraient d'être affinées, **les ordres de grandeur sont très faibles** au regard des quantités de carbone stockées par les arbres.

2.2. Stock de carbone du peuplement

La croissance du peuplement est reconstituée depuis la plantation en 1959 afin d'estimer la séquestration de carbone par les arbres jusqu'à cette date. Cependant, comme les premières données d'inventaire datent de 2003, la croissance est « modélisée » à partir de tables de production. Ce sont les tables anglaises établies en 1976 par la Forestry Commission qui semblent les plus adaptées car elles traduisent une sylviculture plus dynamiques que celles de Décourt. On notera toutefois que l'on est en dehors de leur aire d'application (le domaine atlantique). La classe de fertilité 24 correspondant à une hauteur dominante de 35-36 m à 50 ans et l'itinéraire « line thinning 10 years delay » sont sélectionnés. Ces tables sont utilisées pour reconstituer la croissance jusqu'à la première coupe d'irrégularisation du peuplement, en 1987. Au-delà de cette date, la modélisation de la croissance est simplifiée au maximum : on retient un accroissement constant de 4 tC/ha/an, ce qui correspond à un accroissement en surface terrière de 1,17 m²/ha/an qui est l'accroissement constaté par comparaison des inventaires de 2003 et 2008. Le carbone prélevé lors des coupes est quant-à-lui calculé à partir des données historiques de volume récolté en éclaircie.

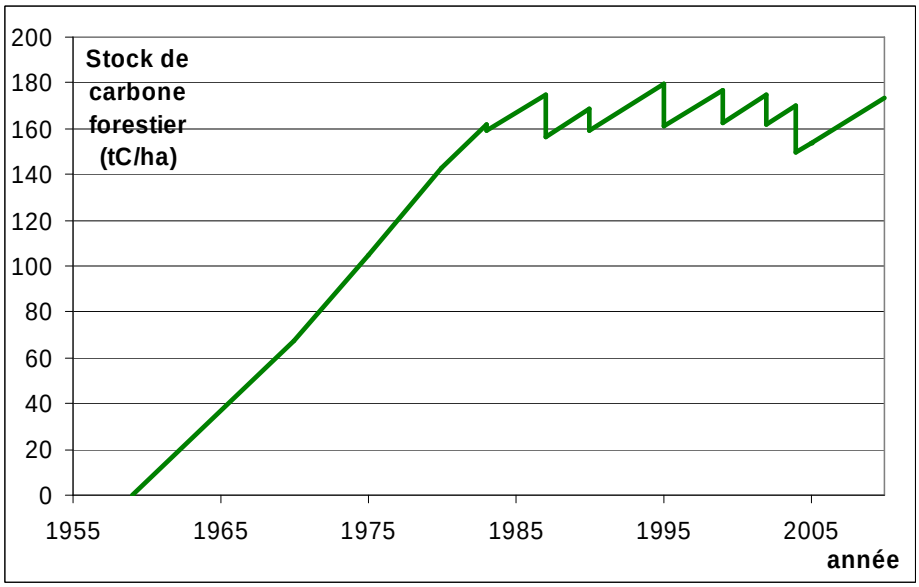


Figure 3. – Évolution des stocks de carbone forestier depuis 1959

La figure 3 illustre l'évolution approximative du stock de carbone du peuplement reconstitué depuis la plantation jusqu'à aujourd'hui. Cette évolution est donnée à titre indicatif : des inventaires réguliers auraient été nécessaires pour avoir l'évolution réelle des stocks de carbone. Même si le stock de carbone du peuplement évolue peu et reste approximativement compris entre 160 et 180 tC/ha depuis 1985, ce stock a été progressivement transféré vers des gros bois de qualité comme le confirme l'état du stock actuel (voir figure 8 du paragraphe 3).
Par ailleurs, la sylviculture irrégulière permet de maintenir un couvert arboré constant et d'éviter ainsi que les stocks de carbone ne retombent à zéro lors d'une coupe rase. Il est toutefois à noter que pour assurer un renouvellement du peuplement, celui-ci doit être décapitalisé pour augmenter la lumière au sol car le passage à la futaie est pour l'instant nul.

Si on considère que la surface terrière d'équilibre de ce peuplement se situe autour de 40 m²/ha, le stock de carbone « à l'équilibre » se situe autour de 150 tC/ha.

2.3. Stock de carbone dans les produits bois

Le carbone stocké dans les produits bois issus des coupes ayant eu lieu sur le site pilote est calculé selon la méthode décrite en annexe 2. La répartition du bois dans les différentes catégories de produits est présentée dans le tableau 2. Cette répartition n'a malheureusement pas été relevée lors de coupes et cette répartition est faite « à dire d'expert ». La valorisation des grumes en produits à forte durée de vie augmente au cours de la vie du peuplement puisque la dimension et la qualité des produits augmente.

Année	Volume prélevé (m3)	V arbre moyen exploité (m3)	Part valorisation palette (%)	Part valorisation papier (%)	Part valorisation sciage bois de structure (%)
1983	6,6	-	20	80	-
1987	43	0,26	20	70	10
1991	21,6	0,4	40	40	20
1995	42,5	1,07	50	10	40
1999	34,1	-	40	10	50
2002	29,1	1,2	20	10	70
2004	40,6	-	20	10	70
2005	7,8	-	20	10	70

Tableau 2. – Répartition des bois exploités en différents produits

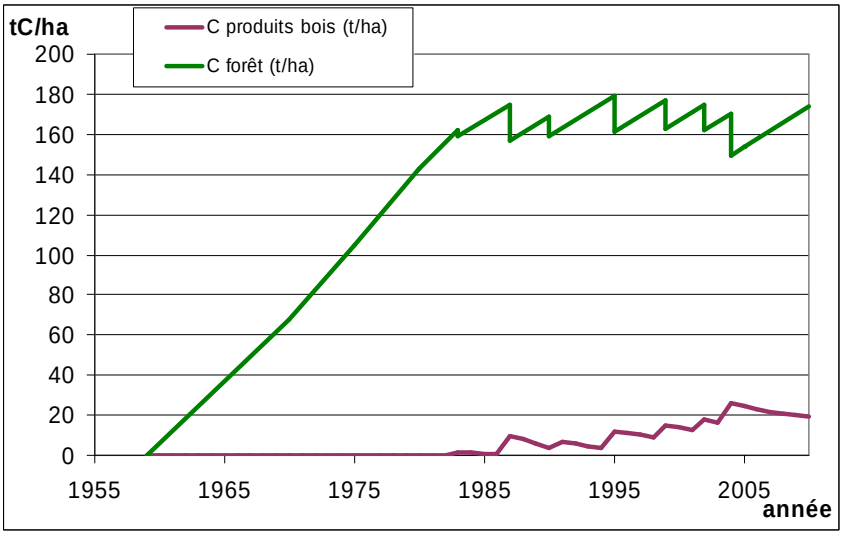


Figure 4. – Évolution des stocks de carbone forestier et dans les produits bois depuis 1959

On constate que la séquestration dans les produits bois est faible au regard de la séquestration en forêt (Figure 2). Toutefois, la durée de vie des produits formés a augmenté lors de l'évolution du peuplement car les arbres prélevés ont un diamètre de plus en plus élevé. La gestion irrégulière a permis et va permettre la production de gros bois de qualité et par conséquent de produits à durée de vie très importante, comme c'est le cas pour le bois de structure. Ainsi, le carbone stocké dans les produits bois devrait augmenter dans les prochaines décennies.

3. Stocks de carbone actuels

Les stocks de carbone actuels du site pilote ont été estimés à partir des données d'inventaire de 2008 mis à disposition par l'AFI et le CRPF Bourgogne. L'inventaire a été réalisé sur les 10 placettes permanentes installées en 2003 sur le site (voir figure 5).

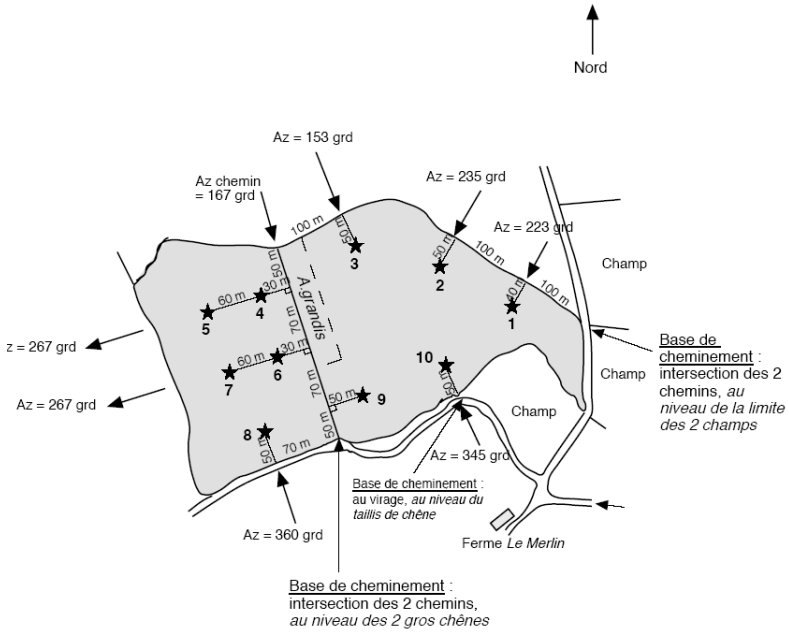


Figure 5. – Plan de localisation des placettes du site n°17. Source : AFI

Contrairement aux autres sites pilotes, les données dendrométriques de ces placettes ont été relevées par inventaire à angle fixe. Cette méthode d'inventaire permet de mieux prendre en compte les gros bois et est donc plus adaptée pour l'estimation du volume sur pied en peuplement irrégulier, du moins lorsqu'on applique un tarif de cubage « peuplement » dont le paramètre d'entrée est la surface terrière.

Les inventaires « carbone » se font classiquement par inventaire à surface fixe afin de calculer le volume total puis la biomasse et le stock de carbone de chaque arbre. Les calculs des stocks de carbone de ce site pilote ont donc nécessité une adaptation : pour chaque placette, les effectifs par essence et par classe de diamètre ont été recalculés afin d'extrapoler les quantités de carbone séquestrée par l'arbre moyen de chaque essence et classe de diamètre. Le détail des calculs permettant le passage de données dendrométriques à des données de stocks de carbone par hectare et décrit en annexe 3.

Les résultats donnent un stock de carbone moyen de **180,8 tC/ha** pour ce site pilote (sans compter le carbone du sol). La figure 4 montre l'hétérogénéité des stocks de carbone au sein du peuplement. Le matériel sur pied est inégalement réparti et les stocks peuvent varier du simple au double selon les placettes. La figure 5 illustre quand à elle le fait que le stock de carbone est situé majoritairement dans les gros bois, et que plus de la moitié du stock est située dans des bois de bonne qualité (A+B).

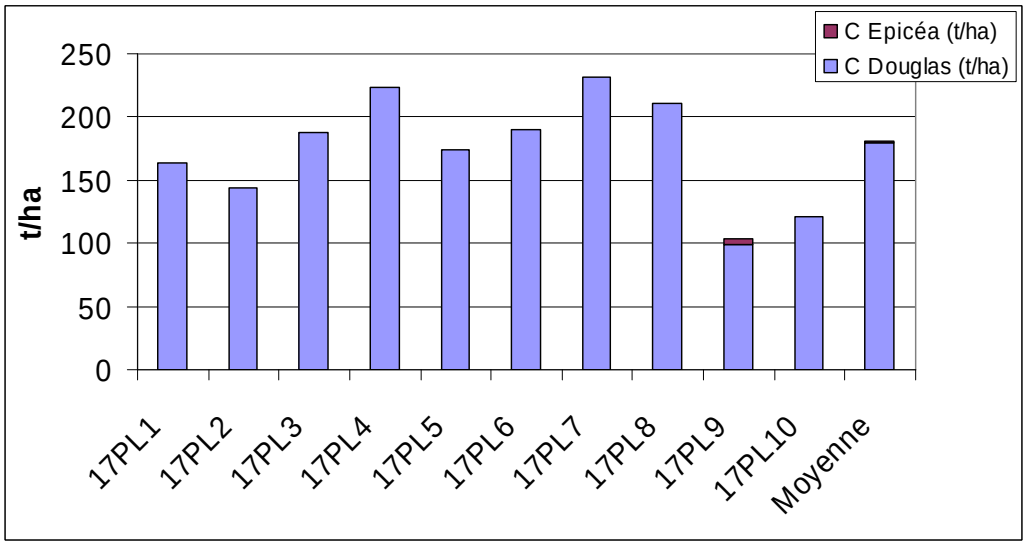


Figure 4. – Stocks de carbone par placette

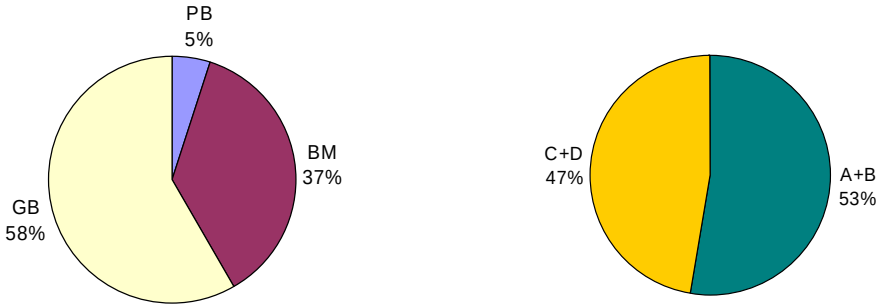


Figure 5. – Répartition des stocks de carbone du peuplement par catégorie de diamètre (a) et par qualité (b)

Annexe 5.
Fiche du site pilote n° 6 : Plantation de chênes en Dordogne

Fiche du site pilote n° 6 : Plantation de chênes

1. Description du site

1.1.Renseignements généraux

Ce site est situé au sein d'une propriété d'une vingtaine d'hectares située en Dordogne.

1.2.Données stationnelles

Température moyenne annuelle : 12° C.
Altitude : 200 m.
Position topographique : Plateau exposé Sud Sud Ouest
Géologie : Grès rouge
Pédologie : Sol sablo-limoneux
Végétation : Acidicline à acidiphile (genêt, ajonc, fougère aigle)
Peuplement forestier : Plantation de chênes sessile de 2005. Densité de 1700 tiges/ha. Présence de protections. Le genêt envahit la plantation.

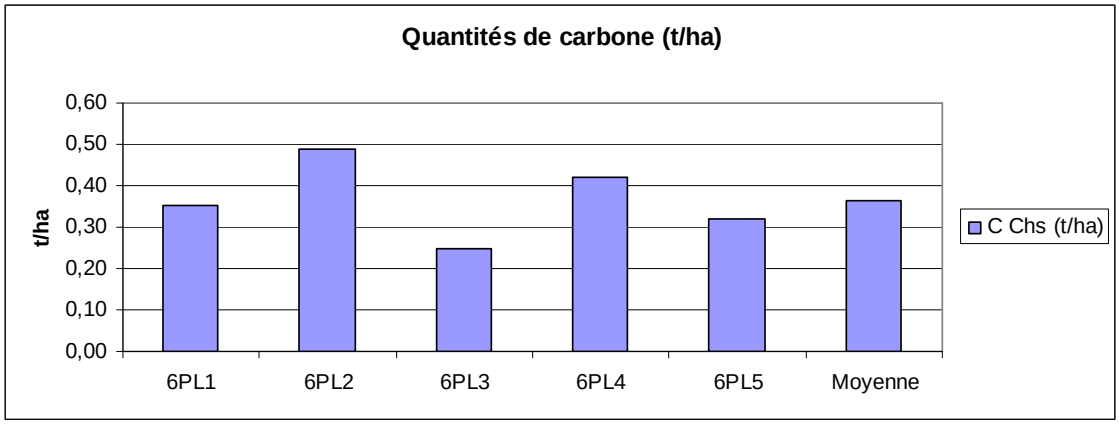
Site pilote 6. Photo : S. Martel

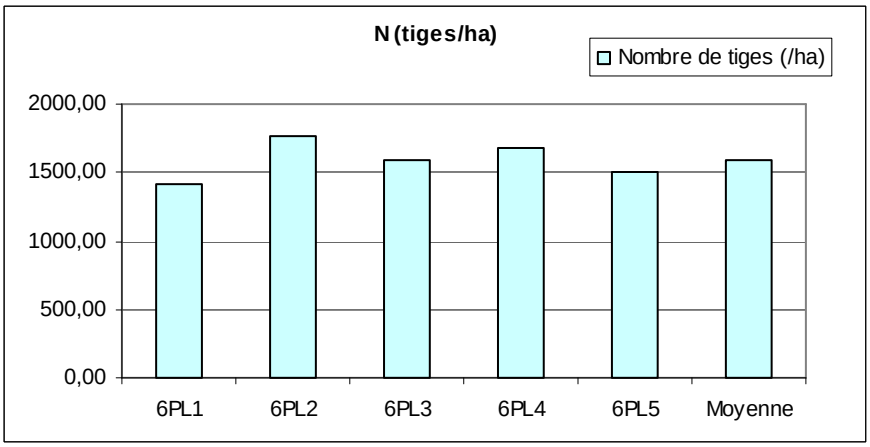
2. Historique du site

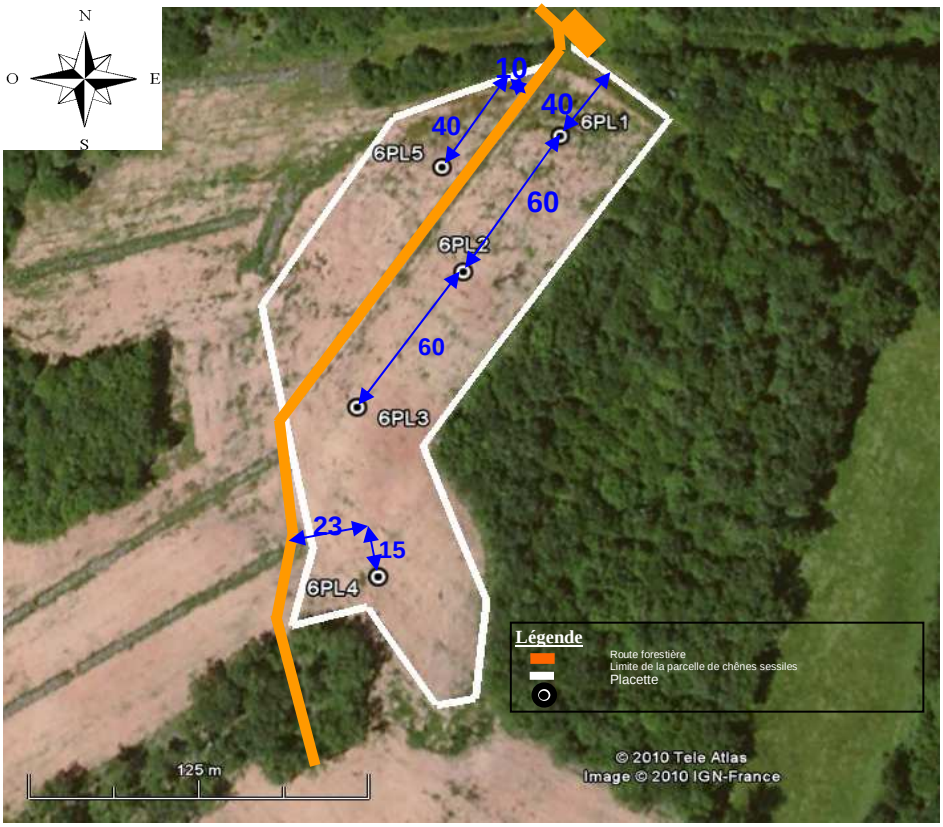
- Après coupe rase d'une chênaie, plantation de pins laricio de Calabre en 1970.
- Plantation abandonnée pendant 10 ans.
- Achat par le propriétaire actuel et début des travaux (débroussaillements et dégagements)
- Reprise de la croissance
- Tempête de 1999 : le peuplement est détruit à 60 %
- Durant le printemps 2000, encore 20 à 30 % est détruit
- Coupe à blanc de chablis en 2003 et 2004
- Labour et hersage en 2004
- Plantation au printemps 2005 de plants certifiés de chêne.

3. Stocks de carbone actuels

Les stocks de carbone actuels du site pilote ont été estimés à partir d'un inventaire mené sur la parcelle de 2 ha. Le fait que les arbres soient très jeunes n'a pas facilité l'estimation des stocks en place. Cinq placettes permanentes ont été mises en place, et les arbres mesurés. Toutefois, l'estimation du stock actuel n'a pas beaucoup de valeur : les quantités trouvées sont très faibles par rapport à l'erreur d'estimation. De plus, le stock de carbone représenté par la végétation accompagnatrice est probablement pour l'instant plus important.







Localisation des placettes permanentes installées

4. Simulation d'évolution des stocks

Des simulations pourront être effectuées à l'aide du modèle Fagacée (Capsis) développé par le LERFOB. Elles n'ont pas pu être effectuées dans le cadre de ce stage, faute de temps.

Annexe 6.
Comparaison de deux méthodes de quantification de la prolongation du stockage dans les produits bois

Comparaison du stockage produits bois avec la méthode CCX

1. Principe de la méthode CCX

Le label de certification américain Chicago Climate Exchange (CCX) propose une méthodologie simplifiée permettant d'estimer la prolongation du stockage dans les produits bois. Cette méthodologie octroie un crédit carbone pour chaque tonne de CO2 contenue dans les produits-bois (en usage ou enfouis en décharge) et qui n'a pas été réémise dans l'atmosphère 100 ans après la récolte. Elle repose sur des facteurs du Département de l'énergie américain qui attribue des facteurs de conversion carbone aux bois rond exploité selon sa destination (bois d'œuvre ou bois d'industrie). Les valeurs retenues sont les moyennes des valeurs régionales américaines.

	Bois d'œuvre	Bois d'industrie
Feuillus	0,276	0,241
Résineux	0,350	0,203

Tableau 1. – Proportion de carbone restant dans les produits bois après 100 ans.
Source : CCX Offset project Protocol - Forestry Carbon Sequestration

Cette méthode considère une relation entre carbone stocké et émissions évitées : la part restante après 100 ans est considérée comme étant un stock constant pour les années suivant l'exploitation. Elle suit une règle du « 1/100é ».

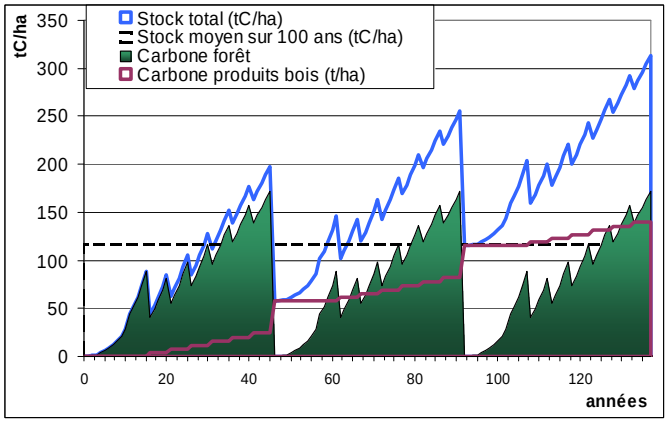
L'application de cette méthode à un exemple de scénario sylvicole permet de mieux la comprendre et permet par ailleurs de comparer les résultats obtenus.

2. Application de la méthode à un exemple : futaie régulière de Douglas

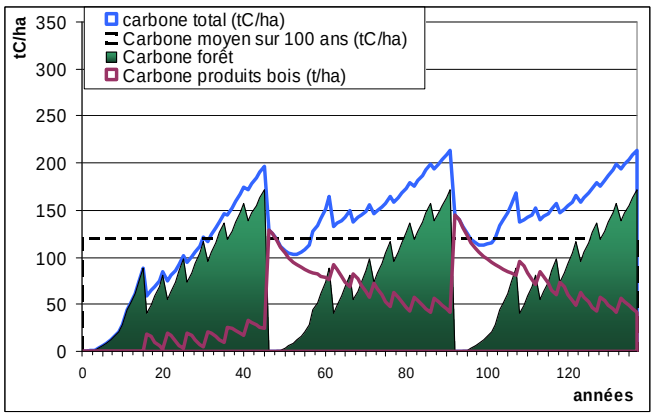
La méthode CCX est appliquée à l'itinéraire sylvicole de futaie régulière de Douglas élaboré dans le cadre d'un allongement des périodes de rotation. La répartition entre bois d'industrie et bois d'œuvre est la même que pour le calcul utilisant les durées de vie apparentes : le bois d'œuvre est composé du bois de structure et le bois d'industrie du bois destiné à l'emballage lourd et à la filière papier-carton. Le tableau 2 présente l'itinéraire sylvicole ainsi que le stock dans les produits bois calculé avec la méthode CCX.

Opération	Age (années)	Ve (m3/ha)	Ce (t/ha)	Part bois industrie (%)	Part bois d'œuvre (%)	Stock dans les produits bois (à 100 ans) BI (tC/ha)	Stock dans les produits bois (à 100 ans) BO (tC/ha)	Stock produits bois total (t/ha)
Eclaircie 1	16	84	17,96	100	0	3,64	0,00	3,64
Eclaircie 2	21	84	17,96	100	0	3,64	0,00	3,64
Eclaircie 3	26	84	17,96	90	10	3,28	0,63	3,91
Eclaircie 4	31	84	17,96	80	20	2,92	1,26	4,17
Eclaircie 5	36	84	17,96	60	40	2,19	2,51	4,70
Eclaircie 6	41	84	17,96	50	50	1,82	3,14	4,96
Coupe finale	45	500	106,88	30	70	6,51	26,18	32,69

Les graphiques 1 et 2 suivant permettent de comparer la dynamique de séquestration selon les 2 méthodes de quantification. La comparaison nécessite le choix d'un cadre temporel : ce choix est d'autant plus problématique que le stockage dans les produits bois avec la méthode CCX est considéré comme infini. Ainsi, avec cette méthode, le stock de carbone des produits bois issus de l'exploitation se cumule et augmente au cours des rotations, dépassant même le stock de carbone en forêt après trois révolutions. C'est la limite de cette méthode de calcul qui ne prend pas en compte la dynamique du carbone du



Graphique 1.



Graphique 2.

compartiment «produits bois ».

Une comparaison des moyennes des stocks de carbone « produits bois » pour différentes périodes de temps est effectuée (tableau 3). Dans l'exemple choisi, on a estimé que l'ensemble du bois d'œuvre produit était valorisé en bois de structure, qui a une durée de vie importante (durée de vie apparente de 31,6 ans) car il s'agit de bois de Douglas. C'est loin d'être toujours le cas : les valorisations bois d'œuvre peuvent avoir des durées de vie plus restreintes, même pour le résineux. On effectue donc également la comparaison entre les deux méthodes pour le même scénario, mais en remplaçant la valorisation « structure » par une valorisation « menuiserie » pour la méthode des durées de vie apparentes. Cela ne change rien à la méthode CCX puisque le bois destiné à la menuiserie est également du bois d'œuvre.

	Stock moyen de carbone dans les produits bois sur la période de temps :		
	45 ans	**100 ans**	**150 ans**
méthode CCX	8,98	44,76	75,88
méthode durée de vie apparente (bois d'œuvre=structure)	10,85	48,62	58,26
méthode durée de vie apparente (bois d'œuvre=menuiserie)	9,77	25,28	26,68

On constate des différences importantes entre les deux méthodes d'estimation des stocks « produits bois ». Les stocks dans les produits bois sont plus élevés avec l'utilisation de la méthode CCX qui semble surestimer le stock « produits bois » et ce, d'autant plus pour des valorisations en bois d'œuvre à durée de vie relativement faible. Il n'en demeure pas moins que cette méthode est beaucoup plus facile d'accès. Il faudrait pouvoir utiliser la méthode CCX avec des proportions de carbone restant sans les produits bois après 100 ans valables pour la France. D'autres méthodes telle que celle de Winjum (1998) mériteraient d'être testées.

Annexe 7.
Plaquette de présentation du club carbone forêt-bois

CLUB CARBONE-FORET-BOIS

VALORISER LE RÔLE DE LA FILIÈRE FORÊT-BOIS FRANÇAISE
DANS LA LUTTE CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

2010

Le carbone a aujourd'hui une valeur grâce à l'émergence de différents mécanismes et marchés nationaux et internationaux mis en place à la suite du protocole de Kyoto. Pourtant, la filière forêt-bois n'est que faiblement touchée par ces incitations, essentiellement à travers la valorisation du bois-énergie.

L'objectif du Club Carbone Forêt-Bois est de mettre en place les conditions pratiques pour permettre aux entreprises et collectivités d'accéder aux marchés du carbone au travers de la filière foret-bois française.

La démarche du club vise à fédérer les efforts de recherche en France, en trois étapes :

- ***Analyser les mécanismes existants de valorisation du carbone forestier (mécanismes de projets du protocole de Kyoto, projets volontaires, systèmes australien et néo-zélandais)***
- ***Mutualiser les retours d'expériences pratiques en France et à l'étranger***
- ***Développer des outils économiques de valorisation du carbone là où ils font défaut***

Le Club Carbone-Forêt-Bois a été fondé en 2010 à l'initiative commune de CDC Climat Recherche, de l'Office National des Forêts et sa filiale ONF International, de l'Institut Technologique Forêt, Cellulose, Bois-construction et Ameublement (FCBA), de la Société Forestière de la Caisse des dépôts, de l'Association des Sociétés et Groupements Fonciers et Forestiers (ASFFOR), de la Forêt Privée Française et du Syndicat des Sylviculteurs du Sud Ouest (SySSO) ***(membres fondateurs)***.

cdc climat recherche — Office National des Forêts — ONF International — Forêt Privée Française — Société Forestière — FCBA Institut Technologique — maison de la forêt — A.S.F.F.O.R. Association des Sociétés et Groupements Fonciers et Forestiers

Programme

Un « club » : quoi et pourquoi ?

- ***Quoi ?***
  - *Un **regroupement** des compétences de recherche et développement (CDC Climat, ONF/ONFI, FCBA, SF, ASFFOR, FPF, SySSO)*
  - *Une **mutualisation** des moyens des filières forêt, bois et carbone (membres)*
  - *Une **structure** adaptable aux priorités des membres*
- ***Pourquoi ?***
  - ***Optimiser la contribution** environnementale de la filière forêt-bois à la lutte contre le changement climatique*
  - ***Faire bénéficier** la filière de **nouvelles sources de revenus,** en utilisant les marchés du carbone*

Livrables du Club

1. ***Conférences semestrielles** rassemblant l'équipe de travail du Club et les membres pour restituer les travaux du Club, favoriser les échanges entre acteurs, et définir les priorités du Club (réservées aux membres).*

2. ***Dossiers de synthèse semestriels** sur l'état des projets forêt et bois dans les marchés du carbone (réservés aux membres).*

3. ***Développement de Méthodologies** :*

   a. ***Elaboration** des méthodologies ou autres outils économiques pour les secteurs où elles font défaut*

   b. ***Validation** des méthodologies par des organismes de certification internationalement reconnus*

4. *Une **Etude Climat** analysant les succès et échecs des instruments existant de valorisation du carbone de la forêt et des produits du bois (projets Kyoto, projets volontaires, systèmes australien et néo-zélandais) dans les pays du Nord et dans les pays du Sud.*

5. *Une **Etude Climat** reprenant le contexte du carbone forestier dans les pays du Nord, identifiant les obstacles à sa valorisation sur les marchés du carbone, et évaluant le potentiel économique de différents projets de séquestration sur le territoire français.*

6. ***Conférences en région** pour faire le point sur les opportunités liées au carbone dans la filière forêt-bois.*

7. ***Bilan annuel** du programme de recherche opérationnelle.*

L'équipe

L'équipe du Club Carbone Foret-Bois, animée par **Benoît Leguet** Directeur de CDC Climat Recherche, est constituée par :

- **Fahrudin Bajric,** Pôle Economie, Energie, Prospective, FCBA
- **Valentin Bellassen**, CDC Climat Recherche
- **Clément Chenost**, ONF International
- **Mariana Deheza**, CDC Climat Recherche
- **Ludovic Guinard,** Pôle Economie, Energie, Prospective, FCBA
- **Jean-Yves Henry,** ASFFOR
- **Olivier Picard,** Forêt Privée Française (CNPF, IDF)
- **Christian Pinaudeau,** SySSO
- **Myriam Rondet,** Société Forestière de la Caisse des Dépôts
- **Marianne Rubio,** ONF
- **Eric Toppan,** Forêt Privée Française

Un réseau d'experts associés

- **Mark Belton,** Permanent Forests International Ltd. - *Nouvelle-Zélande*
- **Philippe Ciais**, LSCE (CEA)
- **Mathieu Fortin,** Interface recherche-gestion (INRA)
- **Franck Lecocq,** LEF (INRA)
- **Denis Loustau,** INRA (EPHYSE)
- **Jean Jacques Malfait,** GREThA (Université Bordeaux IV)
- **Guillaume Pajot,** GREThA (Université Bordeaux IV)
- **Stephan Schwartzman**, Environmental Defense Fund - *Etats-Unis*
- **Silvia Stefanelli,** Autonomous Region of Friuli Venezia Giulia – *Italie*
- **Estelle Vial,** Expertise Analyse Cycle de Vie (FCBA)

Souscription

La participation au Club Carbone Forêt-Bois est soumise à une souscription annuelle fixée à 5 000 euros (HT).

Cette souscription est dédiée au financement du Club Carbone Forêt-Bois et aux travaux de recherche et d'analyse que ses adhérents souhaitent voir mener.

Elle ouvre droit :

- d'assister aux deux réunions annuelles du Club
- de disposer des dossiers de synthèse
- d'accéder au site internet dédié
- d'échanger aves les responsables du club et les experts mobilisés

Le Club Carbone Forêt-Bois n'a pas de but lucratif. Ses fonds sont gérés par CDC Climat Recherche qui exerce le rôle du Secrétariat Général du Club.

CDC Climat est une nouvelle filiale de la Caisse des Dépôts qui regroupe les activités de lutte contre le changement climatique

Contacts:

Club Carbone Forêt-Bois
16, rue Berthollet – 94113 Arcueil
Tél. : +33 (0)1 58 50 37 38 Fax : +33 (0)1 58 50 04 11

Pilotage du Club: Mariana Deheza, mariana.deheza@cdcclimat.com
Souscription et suivi des membres : Malika Boumaza, malika.boumaza@cdcclimat.com

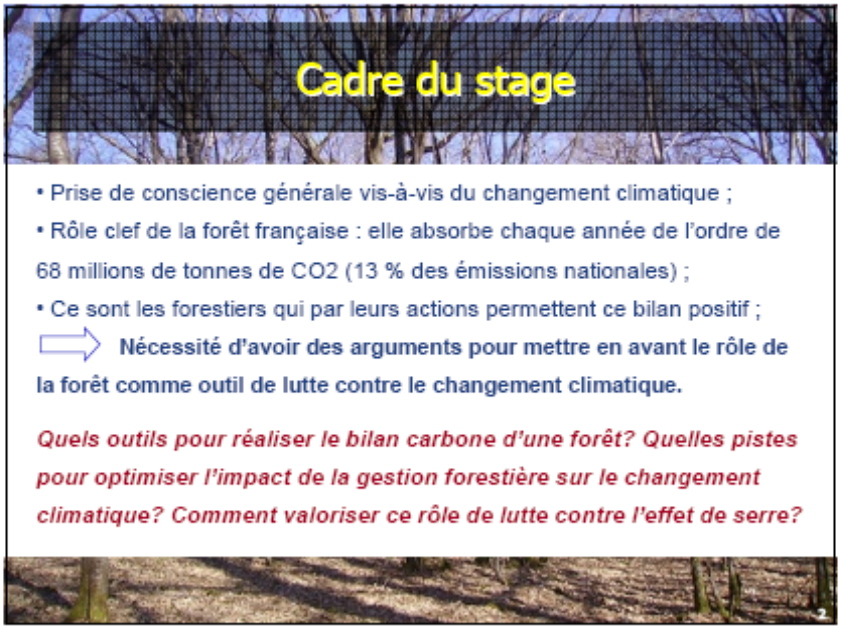
Contact ASFFOR :	Jean-Yves Henry,	jy.henry.asffor@gmail.com
Contact FCBA :	Fahrudin Bajric,	fahrudin.bajric@fcba.fr
Contact Forêt Privée Française :	Eric Toppan,	eric.toppan@foretpriveefrancaise.com
Contact ONF :	Marianne Rubio,	mariannne.rubio@onf.fr
Contact ONFI :	Clément Chenost,	clement.chenost@onf.fr
Contact Société Forestière :	Myriam Rondet,	myriam.rondet@forestiere-cdc.fr
	Véronique Vincent,	veronique.vincent@forestiere-cdc.fr
Contact SySSO :	Christian Pinaudeau,	c.pinaudeau@maisondelaforet.fr

Pour en savoir plus sur CDC Climat et ses autres programmes de recherche :
www.cdcclimat.com

Annexe 8.
Présentation orale réalisée à l'assemblée générale de Forestiers privés de France le 10 juin 2010

Gestion forestière et carbone

Simon Martel - juin 2010



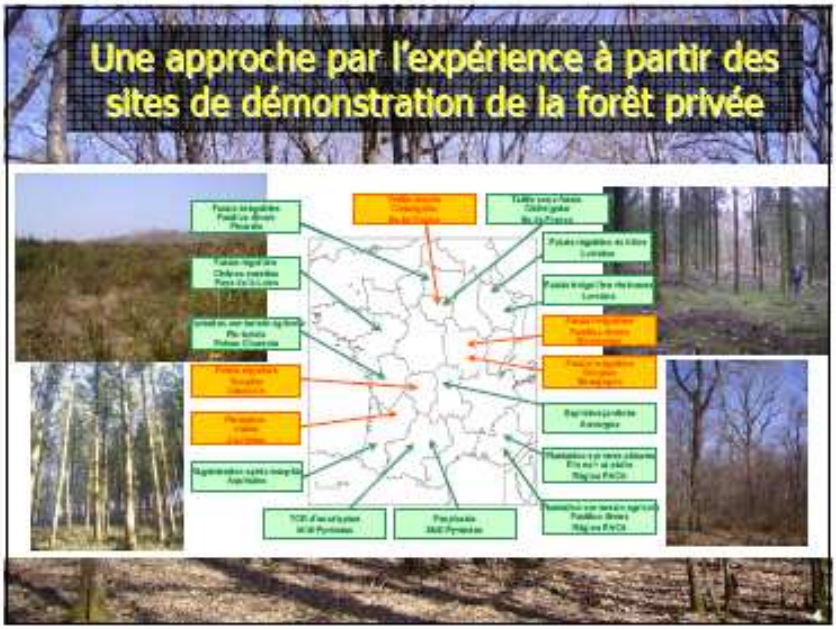
Cadre du stage

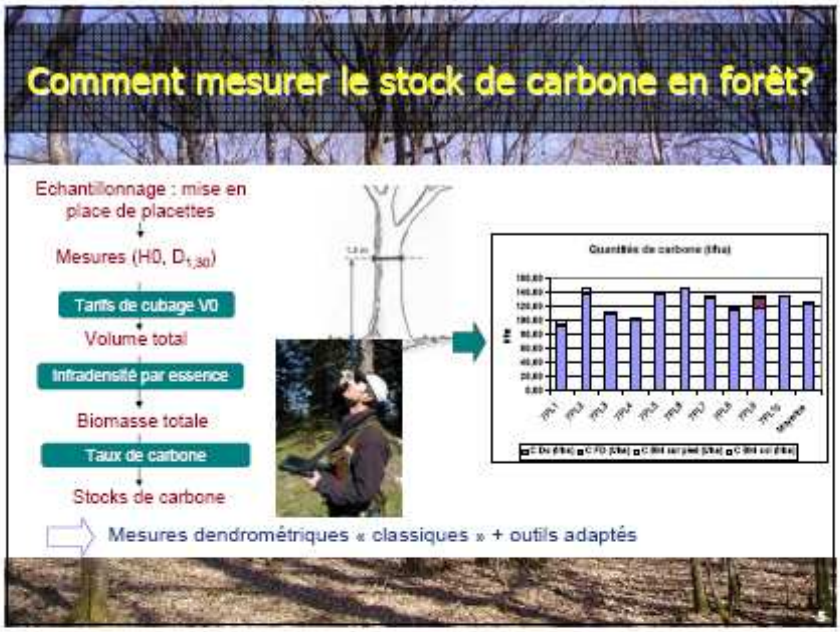
- Prise de conscience générale vis-à-vis du changement climatique ;
- Rôle clef de la forêt française : elle absorbe chaque année de l'ordre de 68 millions de tonnes de CO2 (13 % des émissions nationales) ;
- Ce sont les forestiers qui par leurs actions permettent ce bilan positif ;

⇨ **Nécessité d'avoir des arguments pour mettre en avant le rôle de la forêt comme outil de lutte contre le changement climatique.**

Quels outils pour réaliser le bilan carbone d'une forêt? Quelles pistes pour optimiser l'impact de la gestion forestière sur le changement climatique? Comment valoriser ce rôle de lutte contre l'effet de serre?

En quoi la forêt joue-t-elle un rôle positif?
Photosynthèse
Forêt
1. Séquestration en forêt
Stocks de carbone
2. Stock dans les produits bois
Economie d'émission de GES
Usages du bois
3. Substitution à des matériaux énergivores


Une approche par l'expérience à partir des sites de démonstration de la forêt privée


Comment mesurer le stock de carbone en forêt?
Echantillonnage : mise en place de placettes
Mesures (H0, D1,30)
Tarifs de cubage V0
Volume total
Infradensité par essence
Biomasse totale
Taux de carbone
Stocks de carbone
Mesures dendrométriques « classiques » + outils adaptés

Comment quantifier le rôle joué par les produits bois?
1) Calcul de durées de vie apparentes
Décharge
Brûlage
2) Choix de coefficients de substitution
Economies d'émissions de GES par substitution (t eqCO2/ m3 bois)
Nécessité de connaître le devenir des bois après exploitation!

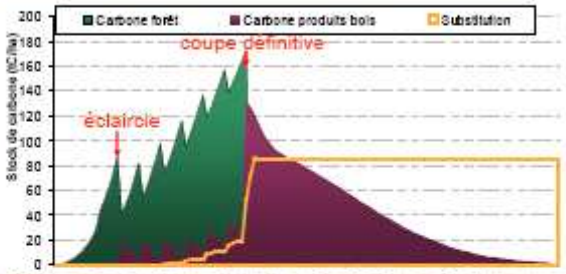
Comment prévoir la dynamique de stockage?

La modélisation est un outil indispensable pour se projeter dans le temps

- Approche scientifique : travaux de l'INRA

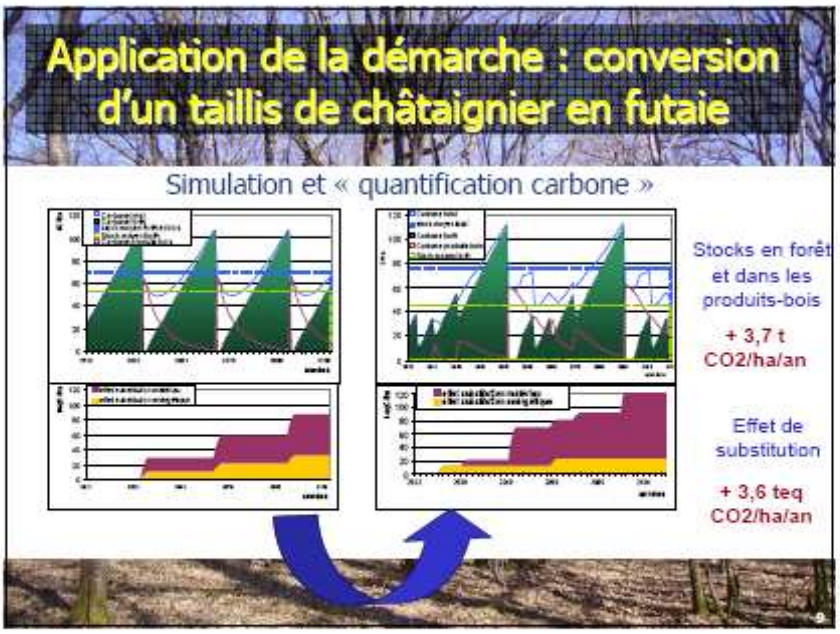
- Approche simplifiée : utilisation de tables de production + débouchés du bois à dire d'expert

Exemple en futaie régulière de Douglas



Zoom sur un cas particulier : amélioration d'un taillis de châtaignier

Conversion d'un taillis en futaie


Application de la démarche : conversion d'un taillis de châtaignier en futaie
Simulation et « quantification carbone »
Stocks en forêt et dans les produits-bois
+ 3,7 t CO2/ha/an
Effet de substitution
+ 3,6 teq CO2/ha/an

L’atténuation de l’effet de serre est un service rendu par la forêt française que propriétaires et gestionnaires privés aimeraient optimiser et valoriser. Des modifications de la gestion sylvicole peuvent permettre une séquestration additionnelle de carbone qui peut alors être valorisée sur les marchés volontaires. Cette étude apporte des éléments sur ces différents points par (i) l’élaboration d’une méthodologie simplifiée de quantification du bilan carbone à l’échelle du peuplement (ii) une estimation des effets additionnels de séquestration en forêt, stockage dans les produits bois et substitution consécutifs à un changement de gestion sylvicole (iii) le bilan économique d’un projet carbone fictif conforme aux standards internationaux.

Les résultats montrent que sur des stations de bonne fertilité, l’amélioration d’un taillis de châtaignier peut amener à séquestrer en moyenne 33 tC/ha et l’allongement de 10 ans des révolutions en futaie régulière de Douglas 25 tC/ha.

La mise en place de tels scénarios de gestion forestière améliorée sous la forme d’un projet carbone labellisé par le standard VCS nécessiterait une taille minimale de projet de 700 ha et un prix de vente d’environ 16 € par tonne de CO_2 pour que l’opération devienne rentable.