

VALORISATION CARBONE DE LA FILIERE FORET-BOIS EN FRANCE

Mariana Deheza¹ et Valentin Bellassen^{2 3}

Cette étude examine les possibilités de valoriser sur des marchés du carbone quatre types d'actions contre le changement climatique dans la filière forêt-bois française :

- Augmenter le stock de carbone en forêt
- Augmenter le stock de carbone dans les produits du bois
- Substituer du bois aux combustibles fossiles (bois-énergie)
- Substituer du bois à des matériaux énergivores (bois-matériau)

Les actions de type « augmentation du stock » sont principalement valorisables sur les marchés volontaires du carbone. Des développements sont néanmoins nécessaires pour mettre en œuvre cette valorisation. Les actions de type « substitution » sont uniquement valorisables sur le marché réglementé du carbone. Elles sont actuellement valorisées au niveau de l'utilisateur (construction immobilière, production d'électricité, production de chaleur, etc.), mais la filière forêt-bois peut tirer partie de ce système, par exemple à travers des contrats d'approvisionnements.

Cette étude a identifié trois catégories de projets qui peuvent être mis en œuvre pour actionner ces leviers dans la filière forêt-bois :

- Reboisement / Déboisement évité
- Gestion forestière améliorée
- Utilisation des produits optimisée (en termes du stockage de carbone)

A travers sept exemples de projets hypothétiques, l'étude identifie des gisements de séquestration de carbone importants en France (plusieurs millions de tonnes de CO₂), notamment par le boisement, la conversion de taillis en futaie, ou l'affectation de la récolte du bois en termes d'usage.

La certification d'un projet carbone coûte cher, de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers d'euros. Elle n'est intéressante qu'à partir d'une taille minimale qui permet au porteur de projet de rentrer dans ses frais. Pour un boisement en France métropolitaine par exemple, d'après nos estimations, l'ordre de grandeur de cette taille critique est de 100 ha.

Sur le marché volontaire du carbone, plusieurs labels coexistent. Leur pertinence est analysée pour les sept exemples de projets hypothétiques identifiés, ainsi que les conditions de valorisation des crédits forestiers français dans les marchés du carbone. Deux conditions doivent en particulier être réunies afin de pouvoir accéder aux marchés du carbone : la validation de méthodologies auprès des labels existants, et une organisation adéquate entre les acteurs de la filière.

¹ Mariana Deheza est chargée de recherche à CDC Climat. Ses domaines de recherche incluent les mécanismes de projet, notamment liés à la compensation volontaire et aux projets forestiers. mariana.deheza@cdcclimat.com + 33 1 58 50 99 85

² Valentin Bellassen est chargé de recherche à CDC Climat, et doctorant au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement. Au sein de CDC Climat Recherche, il effectue des recherches sur la compensation volontaire et l'inclusion de la forêt dans les mécanismes économiques internationaux d'action contre le changement climatique. valentin.bellassen@cdcclimat.com + 33 1 58 50 19 75

³ De nombreux éléments de cette Etude Climat sont repris d'un rapport préliminaire commandité par la Mission Climat de la Caisse des Dépôts et effectué par Arnaud Jullian, Fanny Miss et Baptiste Perrissin-Fabert.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier tous ceux qu'ils ont rencontrés pour préparer ce rapport, en particulier Erik Anderson (Practerra), Yves André (CDC Climat), Fahrudin Bajric (FCBA), Olivier Bouyer et Clément Chenost (ONF International), Frédéric Dinguirard (Andal Conseil), Sébastien Drouineau (CRPF Aquitaine), Pierre Guigon (BlueNext), Damien Kuhn (Kinomé), Elias Izquierdo (Expertos Forestales Agrupados), Sebastiaan Luyssaert (LSCE), Christian Pinaudeau (SySSO), Pablo Rodriguez-Noriega (Agresta Sociedad Cooperativa), Marianne Rubio (ONF), Amélie Seguret (Carbone 4), Silvia Stefannelli (Autonomous Region of Friuli Venezia Giulia, Italy), Eric Toppan (FPF) et Moriz Vohrer (Carbon Fix Standard) pour leur relecture attentive et leurs critiques constructives.

Ils souhaitent remercier également Dominique Bureau (CEDD), Stéphane de Cara (INRA) et Pierre-Alain Jayet (INRA) pour leurs précieuses remarques et suggestions.

Les auteurs assument l'entière responsabilité de toute erreur ou omission.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	4
I. FORET FRANÇAISE ET CREDITS CARBONE	4
A. Une forêt jeune, morcelée et sous-exploitée	4
B. Le secteur forestier : les zones d'ombre de la comptabilité Kyoto	7
C. Complémentaire au protocole de Kyoto, la compensation volontaire	10
II. LE POTENTIEL DE DIFFERENTS PROJETS DE SEQUESTRATION SUR LE TERRITOIRE FRANÇAIS	14
A. Projets de boisement ou de reboisement	14
B. Projets de gestion sylvicole améliorée	20
C. Projets « produits du bois »	27
D. Combien de carbone à 25 ans ?	30
III. PERSPECTIVES DE LABELLISATION	31
A. Les projets forestiers face aux critères de labellisation « carbone »	31
B. Quel label pour quel projet ?	34
C. Exemple d'évaluation de la rentabilité économique d'un projet certifié par un standard volontaire	35
IV. CONCLUSIONS	37
V. LEXIQUE	38
ANNEXE 1 – METHODOLOGIE DES CALCULS REALISES : EXEMPLE DU PROJET DE BOISEMENT A VOCATION DE BOIS D'OEUVRE	39
ANNEXE 2 – ESTIMATION DES CREDITS CARBONE GENERES	43
ANNEXE 3 – CALCUL DU POTENTIEL DE SEQUESTRATION PAR BOISEMENT	45
ANNEXE 4 – HYPOTHESES DE L'EVALUATION ECONOMIQUE	46
VI. REFERENCES	48
VII. LA SERIE 'ETUDES CLIMAT' DE CDC CLIMAT RECHERCHE	51

INTRODUCTION

En France, le cadre réglementaire qui découle du protocole de Kyoto permet de valoriser les réductions d'émissions liées à l'utilisation de bois-énergie. En revanche, il ne permet à ce jour pas de valoriser la séquestration du CO₂ par des projets forestiers ou les produits-bois.

Alors que la plupart des acteurs de la filière forêt-bois française s'interrogent sur la valorisation du carbone dans la filière, et en particulier sur la valorisation de la séquestration du carbone dans les projets forestiers et dans les produits-bois, la filière reste encore peu familiarisée avec les marchés du carbone et leurs exigences opérationnelles.

Après une courte description de l'état de lieu de la filière et de sa position dans marchés carbone « réglementaires », cette étude met l'accent sur le cadre des marchés carbone « volontaires », dans la mesure où ceux-ci pourraient permettre de valoriser la séquestration du CO₂ par des projets forêt-bois mis en œuvre sur le territoire français. A visée d'application pratique, cette étude s'appuie sur sept exemples de projets fictifs qui pourraient rechercher une certification carbone sur les marchés volontaires. Elle quantifie le potentiel de séquestration de ces projets et la quantité de crédits carbone qu'ils pourraient générer. Un modèle d'analyse de la rentabilité économique est également développé pour l'un de ces projets carbone.

I. FORET FRANÇAISE ET CREDITS CARBONE

A. Une forêt jeune, morcelée et sous-exploitée

Un stock et une surface croissants

La forêt française occupe plus d'un quart du territoire métropolitain⁴, avec près de 16 millions d'hectares⁵. Cela correspond à peu près à la moitié de la superficie agricole, et place la France en quatrième position dans l'UE 25 derrière la Suède (31 Mha), la Finlande et l'Espagne (23 Mha chacune).

Depuis le milieu de XIXe siècle, déprise agricole, alternatives énergétiques au bois, programmes de lutte contre les crues et l'érosion et l'effort volontaire des propriétaires forestiers contribuent à l'augmentation de la surface forestière en France, qui correspond à + 40 000 ha/an entre 1993 et 2004 (Source Agreste). Une forêt hors peupleraie met entre 50 et 200 ans pour arriver à l'âge d'exploitabilité. Une bonne partie de la surface boisée actuelle est donc encore « jeune » et en croissance : des estimations du Ministère de l'Agriculture et de l'inventaire forestier national (IFN) indiquent que le stock de bois en forêt augmente annuellement de 103 Mm³.

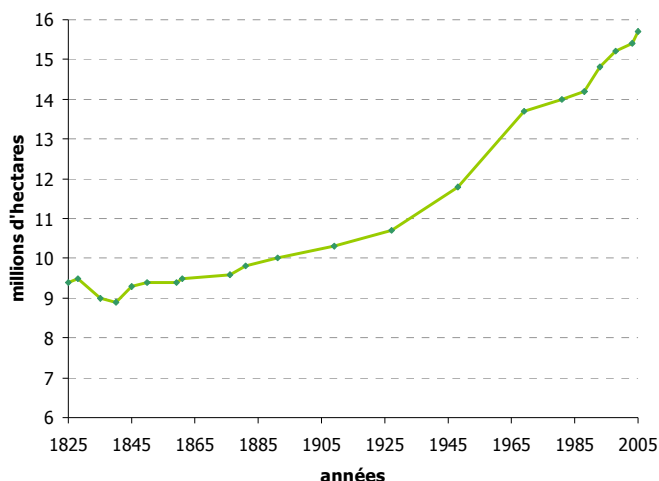
Arrivée à maturité, une forêt tempérée, représentative de la plupart des forêts métropolitaines, peut stocker entre 550 et 1 200 tonnes de CO₂ par hectare (tCO₂/ha) dans sa biomasse aérienne et racinaire⁶. Même si une partie importante du stock carbone dans un écosystème forestier est situé dans le sol, celle-ci n'est pas considérée dans la plupart des nos calculs : les coûts élevés liés à la mesure de ce stock fait qu'il est en pratique ignoré dans les évaluations de projets de séquestration du carbone.

⁴ Avec les forêts tropicales des départements d'Outre-mer la surface totale de la forêt française s'élève à 23 millions de ha ce qui correspond à environ 35% du territoire.

⁵ Estimations de l'IFN d'après la définition de la FAO - tout territoire occupant une superficie d'au moins 50 ares avec des arbres capables d'atteindre une hauteur supérieure à 5 m à maturité in situ, un couvert arboré de plus de 10 % et une largeur moyenne d'au moins 20 mètres.

⁶ Luyssaert et al. (2007).

Figure 1 – Evolution de la surface de la forêt française



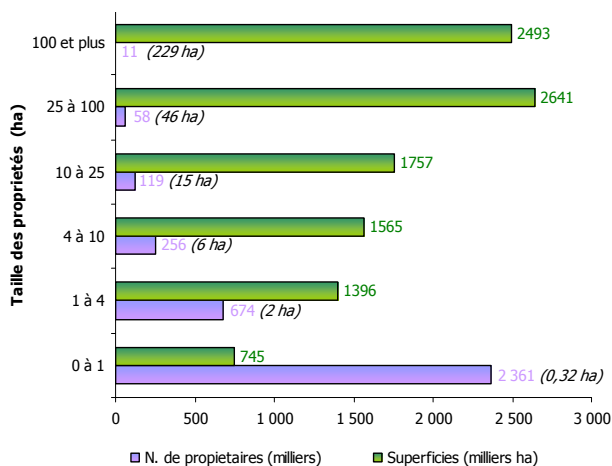
La surface boisée a commencé à croître dès 1850. Au sortir de la Seconde Guerre mondiale, cette croissance s'est fortement accélérée avec la mise en place du Fond Forestier National (FFN) qui a soutenu des boisements à vocation de production. Ces deux dernières décennies la surface forestière a continué à s'accroître de 1,7 millions d'hectares notamment dans les régions de l'arc méditerranéen et sud-ouest.

Source : MAP, IFN 2005.

Une propriété largement privée et morcelée

La forêt française appartient principalement à des propriétaires privés : seuls 26 % de la surface sont publics, détenus à 40 % par l'Etat, et pour le reste par les communes. Cette répartition varie très fortement selon les régions : la forêt publique est quasiment inexistante dans le Sud-ouest, mais représente près de la moitié de la surface forestière dans le Nord-est.

Figure 2 – Structure de la propriété de la forêt privée



Comme l'illustre la Figure 2, la forêt privée est très hétérogène : 25 % sont détenus par des propriétaires (particuliers ou institutionnels) possédant plus de 100 ha, près 83% de propriétaires possèdent moins de 10 ha et 444 000 propriétaires possèdent 77 % de la surface, ce qui entraîne des problèmes de mobilisation et fragmentation de la gestion forestière. Sachant que l'exploitation d'une forêt est rarement rentable en dessous de 4 ha, 20 % de la forêt privée peut être considérée comme « dangereusement » morcelée⁷. Morcellement et jeunesse de la forêt explique une grande partie de l'écart entre production naturelle et récolte de bois, même si d'autres facteurs comme la difficulté d'exploitation de certaines forêts de montagne, la pénurie de bûcherons et l'insuffisante capacité de production de scieries y contribuent également.

* La surface moyenne par échantillon est indiquée entre parenthèses.

Source : CDC Climat Recherche à partir de l'Enquête sur la structure de la propriété forestière privée, 1999.

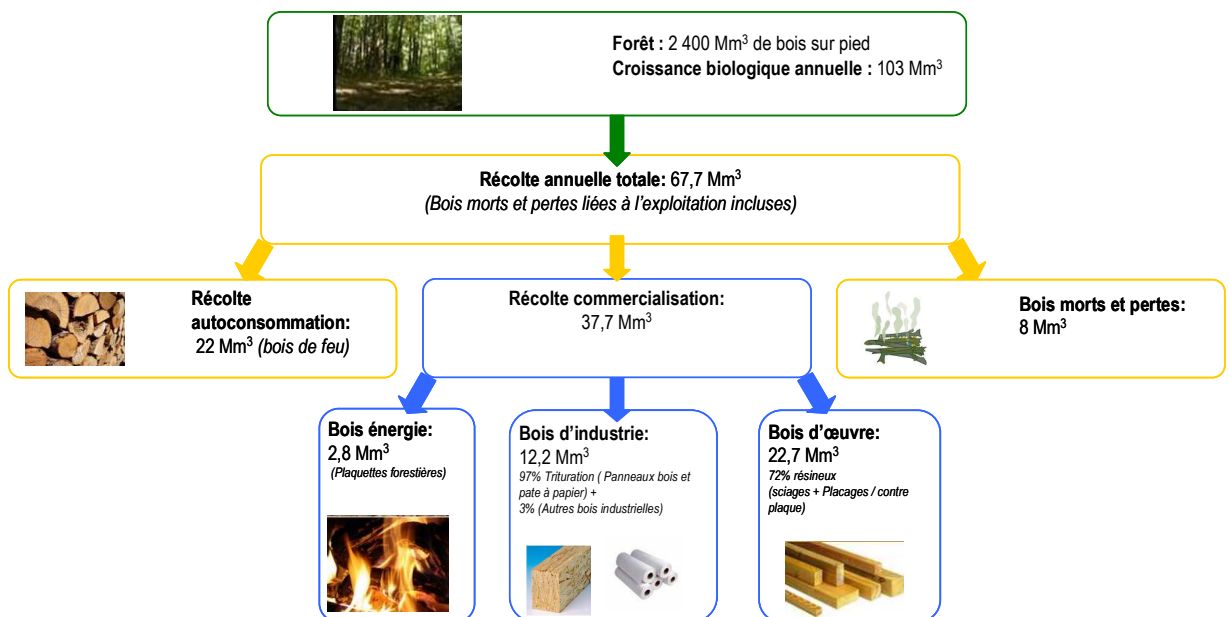
⁷ Puech (2009).

La filière forêt-bois

La filière forêt-bois, de la gestion sylvicole aux producteurs du papier, menuisiers, et autres utilisateurs du bois, représente un poids économique non négligeable, avec 23 540 entreprises⁸, quelques 300 000 emplois, et un chiffre d'affaires global hors taxes de 51,6 milliards d'euros. A titre de comparaison, ce chiffre d'affaires est équivalent à 60 % de celui des constructeurs automobiles et presque 4 fois plus élevé que celui du secteur viticole. La Figure 3 illustre les différents ordres de grandeurs de l'utilisation de cette ressource par les producteurs et les industries en aval, lors des processus de transformation primaire et secondaire. En amont, le niveau de récolte est resté stable ces dernières décennies, tandis que la production des forêts a augmenté, ce qui génère un accroissement net annuel d'environ 40 Mm³. Cet accroissement non exploité doit cependant être relativisé : d'abord parce que les anciennes plantations faites dans le cadre du Fonds forestier national (FFN) dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle commencent seulement à arriver à leur âge d'exploitabilité ; ensuite parce qu'une partie de la forêt n'est pas gérée pour des raisons économiques et structurelles : pentes trop fortes, desserte insuffisante, taille de parcelle trop petite, etc.

Lors de la récolte, environ 10 % du bois (branches, bois mort,...) reste en forêt. Un tiers est « autoconsommé » par les propriétaires sous forme de bois de chauffage. Seuls 55 % du volume coupé récolté est commercialisé, essentiellement sous forme de bois d'œuvre, à l'intention des charpentiers et menuisiers, et de bois d'industrie, à l'intention des producteurs de papier et des panneaux.

Figure 3 – Schéma des usages du bois en France, en millions de m³ (Mm³)



60 % du bois récolté sert aux industries de panneaux et de papeterie ainsi qu'à la production d'énergie, les 40 % restants sont utilisés pour la fabrication des placages ou comme bois massif. Le bois de chauffage à usage domestique représente la majorité de l'utilisation du bois-énergie.

Source : CDC Climat Recherche à partir des données du MAP, IFN, INSEE et CNPPF.

Cette description de la filière forêt-bois permet de dégager trois niveaux possibles d'action contre le réchauffement climatique : (1) l'augmentation ou le maintien du stock de carbone en forêt, qui peut se faire soit en reboisant, soit en évitant de déboiser ou finalement en améliorant les pratiques forestières; (2) l'augmentation du stock de carbone dans les produits-bois ; et (3) la diminution des émissions d'autres filières par effet de substitution, comme par exemple l'utilisation de bois-énergie à la place de fioul domestique ou de bois-matériau pour remplacer l'acier dans les charpentes.

⁸ 89 % des entreprises de la filière ont moins de 20 employés. Ces chiffres sont extraits du Mémento FCBA 2008-2009.

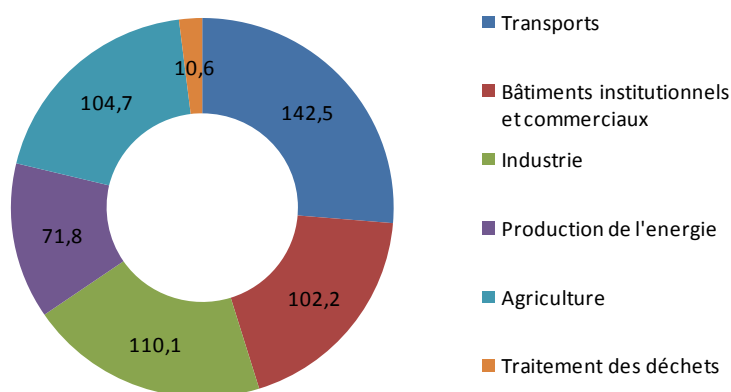
B. Le secteur forestier : les zones d'ombre de la comptabilité Kyoto

Comprendre comment inciter le secteur forestier à optimiser sa contribution à la lutte contre le changement climatique, c'est d'abord comprendre sa contribution au solde national d'émissions de gaz à effet de serre (GES). Mais c'est surtout comprendre comment ce solde est pris en compte dans la comptabilité « Kyoto ». Les règles de comptabilisation du secteur forestier par le protocole de Kyoto déterminent en effet le type d'incitation « carbone » qui peut être mis en place.

La forêt française absorbe 72,3 millions de tonnes de CO₂ par an

En 2007, les émissions de GES de la France ont représenté 531 millions de tonnes d'équivalent-CO₂ (CO₂e), sans prendre en compte les émissions et les absorptions de CO₂ liées aux changements d'usage des terres et à la forêt. Avec 141 MtCO₂e le secteur du transport est le principal émetteur, suivi par l'industrie manufacturière et l'agriculture. Les changements d'usage des terres et la croissance forestière ont quant à eux généré une séquestration nette de 72 MtCO₂, soit 13 % des émissions nationales.

**Figure 4 – Emissions françaises de GES par secteur en 2007 en MtCO₂e
(total hors UTCF: 531 MtCO₂e)**



Source : CITEPA / inventaire SECTEN.

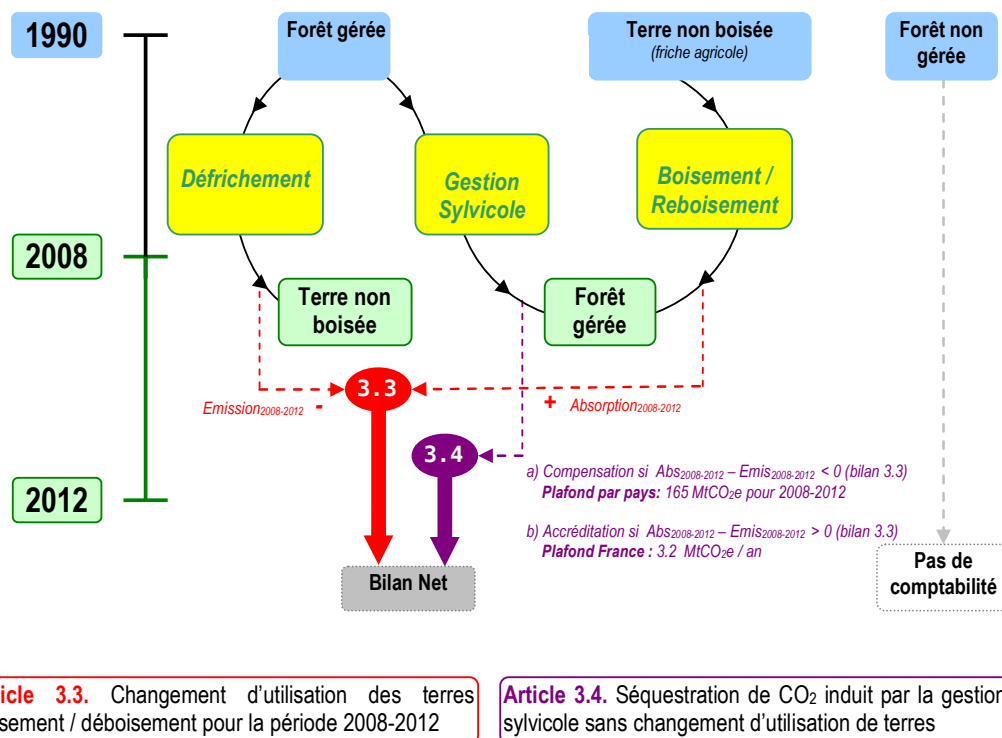
Les crédits « Kyoto » forestiers reçus par la France : 3,2 MtCO₂/an

Dans le cadre du protocole de Kyoto, signé en 1997, 40 pays industrialisés, dont la France, se sont fixés des engagements de stabilisation ou de réduction de leurs émissions anthropiques de GES. Ces pays développés, dits « Pays inscrits à l'Annexe I », reçoivent une quantité de crédits carbone – Unités de Quantité Attribuée ou UQA – correspondant à leur objectif d'émissions sur la période 2008-2012, hors secteur forestier. Ils remettent également chaque année à la Convention-cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) un inventaire de leurs émissions de GES, et s'attachent à posséder autant d'UQA que les émissions indiquées par leur inventaire. Pour ce faire, ils peuvent réduire les émissions sur leur territoire, acheter des UQA à d'autres pays, ou investir dans des projets réducteurs d'émissions dans le cadre des mécanismes de flexibilité du protocole de Kyoto. Ils peuvent également, sous certaines conditions, se voir attribuer un autre type de crédits carbone, les Unités d'Absorption ou UA, issus de leur secteur forestier.

Les règles d'attributions de crédits carbones forestiers (UA) pour les pays développés

Les règles d'attribution des crédits liés à l'utilisation des terres, leurs changements et la forêt (UTCF) sont établies par les articles 3.3 et 3.4 du protocole de Kyoto : l'article 3.3 s'applique aux boisements, reboisements et déboisements, et l'article 3.4 concerne les terres dont l'usage est resté forestier depuis 1990, incluant donc les coupes rases suivies de régénération.

Figure 5 – La comptabilisation « Kyoto » des émissions et absorptions du secteur forestier



Source : CDC Climat Recherche.

Forêt gérée (comptabilisation optionnelle)

L'article 3.4 du protocole de Kyoto permet aux pays de l'annexe I, de façon optionnelle, d'inclure dans leur inventaire national les émissions et séquestration de carbone liées à la gestion des forêts⁹. Dans la pratique, il s'agit du changement du stock de carbone des terres demeures d'usage forestier depuis 1990. Pour limiter les effets d'aubaine liés au vieillissement normal des forêts et à leur croissance dopée par les changements climatiques, le protocole de Kyoto plafonne la quantité d'UA qu'un pays peut recevoir grâce à un « solde 3.4 » positif. Sur la période 2008-2012, la France, qui a opté pour la comptabilisation de sa « gestion forestière », recevra donc de la CCNUCC autant d'UA qu'elle de tonnes de CO₂e dans son « solde 3.4 », jusqu'à un plafond de 3,2 millions de tonnes de CO₂ par an¹⁰. Or en 2007, le « solde 3.4 » français était d'environ 72 millions de tonnes de CO₂e, soit nettement plus que le plafond créditable. Comme ce chiffre n'est pas susceptible de varier fortement sur la période 2008-2012, l'Etat français ne reçoit donc aucune incitation à promouvoir l'amélioration de la gestion forestière ni dans les forêts publiques ni dans les forêts privées: un projet qui augmenterait la séquestration des forêts françaises ne changerait rien aux 3,2 millions d'UA que recevra la France chaque année au titre de l'article 3.4.

Boisement/reboisement/déboisement (comptabilisation obligatoire)

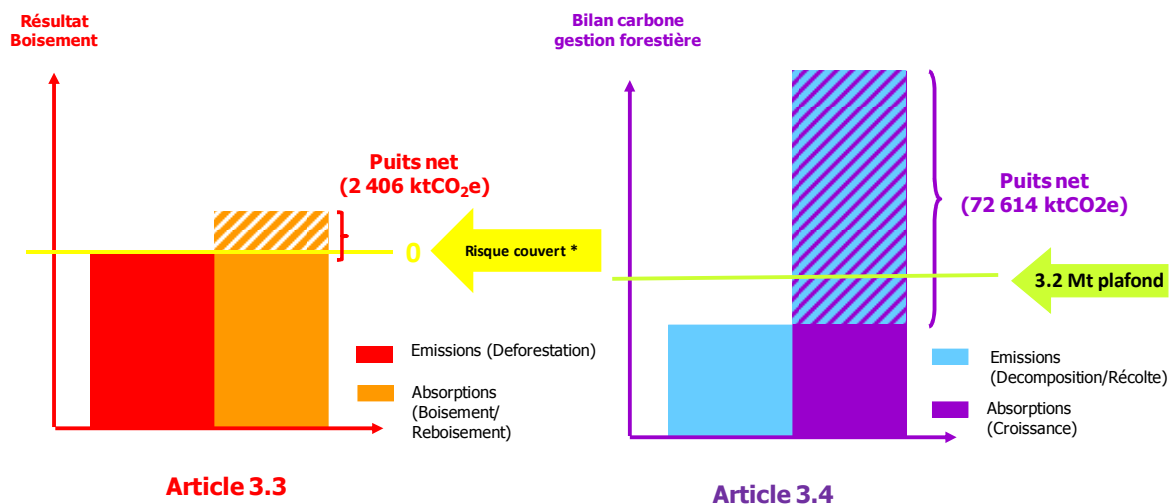
L'article 3.3 du protocole de Kyoto impose la comptabilisation des émissions et séquestrations liées aux opérations de boisement et de déboisement débouchant sur un changement d'usage de la terre. La variation nette du stock de carbone de ces terres ayant changé d'usage depuis 1990 constitue le « solde 3.3 ». Pour l'année 2007, l'inventaire national fait état d'un solde légèrement positif (2,4 MtCO₂e/an, source : MAP - IFN). Ce résultat n'est qu'indicatif, puisque les objectifs de Kyoto sont définis pour la période 2008-2012. Sur ces cinq années, le solde est susceptible de changer, notamment en cas de déboisements non prévus ou modification de la méthode d'inventaire.

⁹ Définition de gestion forestière (décision 11/COP7) : Ensemble d'opérations effectuées pour administrer et exploiter les forêts de manière à ce qu'elles remplissent durablement certaines fonctions écologiques (y compris la préservation de la diversité biologique), économiques et sociales pertinentes.

¹⁰ Ce plafond a été accordé par tous les pays de l'annexe I (Décision 16/CMP.11).

Si le solde devient négatif, la France est autorisée à combler ce déficit à l'aide du surplus « inépuisable » produit par l'article 3.4 jusqu'à un plafond de 9MtCO₂/an. Un projet de boisement qui réduirait un tel déficit n'aurait donc pas d'incidence sur les comptes « carbone » de l'Etat, qui resteraient à zéro. Ce risque explique la difficulté à mettre en place un mécanisme d'incitation carbone classique, impliquant la rétrocession par l'Etat d'un crédit carbone : en cas de solde négatif sur l'article 3.3, l'Etat n'obtient pas d'UA, et ne peut donc pas en rétrocéder aux propriétaires qui boisent leurs terrains.

Figure 6 – Soldes « Kyoto » de la forêt française en 2007



* Grâce au grand surplus de l'article 3.4

Le bilan de l'article 3.3 entre les activités de reforestation et déforestation laisse à la France un faible puits. Une légère augmentation de la déforestation pourrait changer ce résultat avant 2012, cas dans lequel la France passerait à un solde nul au titre de l'article 3.3. En ce qui concerne la « gestion sylvicole », la France recevra un maximum de 3.2 millions de tonnes des crédits par an, bien moins que le « solde 3.4 » de 72,6 MtCO₂e/an.

Source : CDC Climat Recherche à partir des données du CITEPA (Inventaire 2007).

Ces chiffres agrégés au niveau national cachent des disparités régionales car les rythmes régionaux de boisement/déboisement depuis 1990 ne sont pas uniformes. Certaines régions ont un solde de boisement largement positif (Provence-Alpes-Côte d'Azur, Rhône-Alpes). D'autres ont solde négatif, comme la Guyane qui représente à elle seule 35 % des émissions liées au déboisement. L'Aquitaine est une région particulière où les soldes de boisement et de déboisement s'équilibrent, représentant chacun à peu près 10 % du total national.

Les incitations existantes pour la filière forêt-bois

Séquestration dans les produits bois

La séquestration de carbone dans les produits bois n'est pas prise en compte dans le protocole de Kyoto. Tout le carbone du bois est considéré comme immédiatement réémis à sa sortie de forêt.

Substitution bois-matériau et bois-énergie

Une autre voie de contribution de la filière forêt-bois à la lutte contre le changement climatique se trouve dans l'utilisation de bois comme une alternative moins émettrice, en tant que combustible pour la génération d'énergie ou en tant que matériau en remplacement de béton ou d'acier dans le secteur de la construction par exemple. Dans les deux cas, l'incitation « carbone » à utiliser du bois comme substitut d'autres matériaux ou combustibles est déjà en place au niveau national : une diminution des émissions des secteurs de l'énergie ou de la production de matériaux de construction est automatiquement reportée dans l'inventaire national français, et libère par conséquent des UQA.

Deux mécanismes diffusent cette incitation au niveau local :

- Les plus grosses installations industrielles de production d'énergie ou de production de matériaux de construction sont soumises au Système Communautaire d'Echange de Quotas d'Emissions (SCEQE)¹¹ de CO₂. Au niveau de la production d'énergie, le SCEQE a incité certaines centrales à substituer une partie de leur charbon par du bois. Le SCEQE limite également les émissions des gros producteurs d'acier, conférant, en théorie, un avantage compétitif aux poutres en bois par rapport aux poutres en acier. Cependant, il est possible que cette « incitation carbone » fonctionne également comme compensation en cas de perte de part de marché : si la production d'acier est réduite à cause d'une augmentation de l'usage de bois, les quotas « libérés » sur les comptes carbone des producteurs d'acier peuvent être revendus sur le marché.
- Les petites installations non soumises au SCEQE peuvent mettre en place un projet domestique¹², réducteur d'émissions. C'est en particulier le cas pour les petites installations de production de chaleur. Dans ce cadre, l'Etat délivre au projet des crédits carbone (URE) correspondant aux émissions réduites, et qui ont donc disparu de l'inventaire national. Parmi les différentes méthodes éligibles, on trouve l'utilisation de biomasse forestière pour la production de chaleur, en substitution d'un combustible fossile. Cette approche est opérationnelle en France depuis l'année 2007, et trois projets ont déjà été agréés pour des réductions prévues de 0,9 MtCO₂ sur la période 2008-2012.

La complexité de ces règles de comptabilité ne facilite pas la mise en place de mécanismes valorisant la contribution du secteur forêt-bois à la lutte contre le changement climatique dans le cadre du protocole de Kyoto : seule la substitution (bois-énergie et bois-matériau) bénéficie de deux outils dérivés du protocole. Des mécanismes économiques complémentaires peuvent néanmoins être mis en œuvre dans le cadre de la compensation volontaire.

C. Complémentaire au protocole de Kyoto, la compensation volontaire

Plus souple et moins développée que la compensation « Kyoto »

Parallèlement à la mise en œuvre des mécanismes réglementaires du protocole de Kyoto, un nombre croissant d'entreprises, d'acteurs publics et de particuliers, non soumis à une contrainte de réduction d'émissions, s'engagent volontairement à compenser leurs émissions de gaz à effet de serre. Ces engagements créent une demande de « compensation carbone ». La compensation carbone consiste à compenser partiellement ou totalement ses émissions en acquérant des crédits carbone (unités de réduction d'émissions ou séquestration carbone générées par des projets). Ce marché est encore de taille modeste mais connaît une croissance rapide. En 2008, 54 millions de tonnes d'équivalent CO₂ ont été échangées dont 17 % sont issues de projets forestiers¹³. Le prix moyen de la tonne avoisine les 4 euros avec cependant une forte variabilité selon la « qualité » des projets, et de la valeur d'image que les acheteurs peuvent en tirer. Ces chiffres modestes sont à comparer aux 600 millions de tonnes équivalent CO₂ qui sont échangés via les projets développés dans le cadre « Kyoto » (MDP et MOC¹⁴) à des prix souvent supérieurs, pouvant atteindre 15 euros par tonne. L'évolution du marché volontaire dépend en partie de l'issue des négociations internationales qui définiront le régime post-Kyoto et du développement d'autres marchés carbone au niveau mondial.

¹¹ Directive 2003/87/CE, encadrant le système qui depuis 2005 couvre 11 000 sites industriels en Europe.

¹² Décret 2006-622 du ministère de l'Ecologie et du Développement durable, et arrêté du 2 mars 2007.

¹³ Hamilton et al. (2009).

¹⁴ MDP : Mécanisme du développement propre, qui permet aux pays de l'annexe 1 d'obtenir des crédits d'émissions en investissant dans des projets de réduction ou d'évitement d'émissions de GES dans un pays en développement. MOC : Mise en Œuvre Conjointe, qui permet des échanges entre pays de l'Annexe 1, à partir de l'investissement dans des projets dans un autre pays de l'annexe 1 ou sur la base de règles nationales comme en France dans le cadre des projets domestiques.

Projet carbone forestier : les grands principes de qualité

Le développement du marché volontaire a suscité des inquiétudes en raison de scandales révélés par la presse. Des crédits issus de projets de compensation de mauvaise qualité ont été vendus, menaçant la crédibilité de l'ensemble du secteur. Pour limiter ces dérives, des labels de qualité ont vu le jour sur le marché volontaire. Leur objectif est de garantir l'intégrité environnementale des projets qu'ils certifient, c'est-à-dire d'assurer que les tonnes de carbone qui s'échangent sur le marché volontaire correspondent à des réductions d'émissions réelles. Les trois principaux critères de certification qui se dégagent du cahier des charges de chaque label sont :

- **L'additionnalité** : tous les standards volontaires suivent les principes d'additionnalité des Nations Unies. Le porteur de projet doit démontrer que le projet engendre des bénéfices environnementaux (séquestration supplémentaire de carbone par rapport à un scénario de référence) et qu'il n'aurait pas pu être mis en œuvre en l'absence de crédits carbone (un projet qui aurait été rentable sans l'obtention de crédits n'est en général pas éligible). La démonstration financière de l'additionnalité peut toutefois être remplacée par la démonstration de l'existence de barrières technologiques ou culturelles à la mise en œuvre du projet. Certains labels autorisent également l'établissement d'un seuil de performance comme critère d'évaluation de l'additionnalité. La preuve devra être faite que le projet va au-delà des préconisations réglementaires du pays qui l'héberge.
- **La permanence** : pour pallier les risques d'incendies ou de tempêtes, et donc de réémission des tonnes de carbone séquestrées par la forêt, un système d'assurance avec mise en réserve (buffer) d'une partie des crédits délivrés à chaque vérification du bon déroulement du projet a été établi par la plupart des labels. Dans le cas où un projet est confronté par exemple à un sinistre naturel (incendies, maladie, etc.) les crédits qui ont été déjà vendus sont remplacés par les crédits accumulés dans la réserve par les forêts toujours en place, garantissant ainsi aux acheteurs de crédits la permanence de leur compensation.
- **Le double-compte** : la traçabilité des unités de carbone qui s'échangent sur les marchés volontaires est une condition nécessaire pour asseoir leur crédibilité. Les labels veulent ainsi s'assurer que les « crédits » carbone qu'ils certifient ne sont pas déjà comptés dans les inventaires nationaux des pays de l'annexe 1 ou ne sont pas inclus ou utilisés dans un autre mécanisme d'échange de quotas comme le SCEQE. Si cela était le cas, la même réduction d'émissions serait comptée deux fois : une fois dans l'inventaire national du pays hôte, et une fois en tant que « crédit » carbone volontaire. Pour éviter ce risque, propre aux pays soumis aux régimes réglementés, les labels exigent que les tonnes correspondant aux crédits délivrés à un projet soient retirées au préalable de l'inventaire national.

Les différents labels de compensation volontaire

Une petite dizaine de labels de qualité coexistent actuellement sur le marché de la compensation volontaire. Cette étude se concentre sur ceux qui autorisent la certification des projets forestiers dans les pays de l'Annexe I : Voluntary Carbon Standard, Carbon Fix Standard, Climate Community and Biodiversity Standard, et standard Chicago Climate Exchange, inclus pour des raisons méthodologiques.

Voluntary Carbon Standard (VCS)

Le Voluntary Carbon Standard (www.v-c-s.org) est développé depuis mars 2006 par l'association Climate Group, l'International Emissions Trading Association et le World Economic Forum Global Greenhouse Register. Le label a créé une unité de crédit carbone : la Voluntary Carbon Unit (VCU). VCS aspire à devenir le label de référence du marché volontaire et est déjà utilisé par une majorité de porteur de projets forestiers. En 2008, les crédits VCS s'échangeaient autour de 4€¹⁵.

¹⁵ Hamilton et al. (2009).

Chicago Climate Exchange (CCX)

Le Chicago Climate Exchange (www.chicagoclimatex.com), créé en 2003, est un marché qui fonctionne comme une véritable bourse où s'échangent des unités de CO₂ et de cinq autres GES entre les entités engagées volontairement dans le système. Dans les cas des projets forestiers l'actif échangé s'appelle un Exchange Forestry Offset (XFO). Treize projets forestiers ont été enregistrés au près de CCX et vérifiés¹⁶. Le cahier des charges du CCX est en règle générale plus souple que celui des projets MDP et entre 2007 et au premier semestre 2009 les crédits s'échangeaient entre 0,4 € et 4,9 € la tonne de CO₂¹⁷.

D'abord limité aux projets issus de pays non signataires du protocole de Kyoto, ce marché s'est ouvert en 2008 aux projets de réduction d'émissions de GES du monde entier, sauf pour les pays qui sont soumis à des contraintes d'émissions et qui ont établi un mécanisme d'échange de quotas¹⁸. C'est le cas de la France, mais nous incluons néanmoins ce standard car sa méthodologie de comptabilité du stockage dans les produits bois est utilisée dans la section «Projets».

Carbon Fix

Le Carbon Fix Standard (www.carbonfix.info) a été développé par des scientifiques internationaux spécialisés dans les domaines de la forêt, de l'environnement, et du changement climatique. Ce label certifie des projets forestiers de boisement/reboisement qui sont ensuite vérifiés par des entités tierces. Projets certifiés par ce standard gagnent des crédits VER (Voluntary Emission Reductions).

Il se distingue par la simplicité de ses méthodologies, aisément utilisable par un forestier non-spécialiste des questions « carbone ». En 2008, ces crédits s'échangeaient autour de 13 €¹⁹, mais le marché semble relativement étroit.

Climate, Community and Biodiversity Standard (CCBS)

Le Climate, Community and Biodiversity Standard (www.climate-standards.org) a été créé par Climate, Community and Biodiversity Alliance, en coopération avec des experts scientifiques et des ONG. La première version du standard a été publiée en mai 2005. Le but de ce label est de promouvoir des projets forestiers (boisement, déforestation évitée, gestion sylvicole améliorée) qui luttent contre le changement climatique tout en bénéficiant aux communautés locales et à la biodiversité.

A la différence des trois autres standards, ce label certifie un projet dans son ensemble comme « bon pour le climat », mais ne délivre pas de crédits correspondant à une quantité exacte de tonnes séquestrées. Il est de ce fait couramment employé en conjonction avec l'un des labels précédents similairement à la certification FSC.

¹⁶ Jusqu'en janvier 2010.

¹⁷ Hamilton et al. (2010).

¹⁸ <http://theccx.com/info/advisories/2008/2008-01.pdf>

¹⁹ Hamilton et al. (2009).

Tableau 1 – Présentation synthétique des standards qui certifient des projets forestiers

Labels	Voluntary Carbon Standard	Chicago Climate Exchange	Carbon Fix Standard	Climate, Community and Biodiversity Standard
Unité de crédits	Voluntary Carbon Unit (VCU)	Exchange Forestry Offsets (XFO)	Verified Emission Reduction (VER)	Pas de crédits délivrés, mais une double certification possible (avec CFS ou VCS exemple)
Types de projets forestiers acceptés	Boisement/déforestation évitée Nouvelle gestion sylvicole Séquestration dans les produits du bois	Boisement/déforestation évitée Nouvelle gestion sylvicole Séquestration dans les produits du bois	Boisement	Projets forestiers d'atténuation du changement climatique qui produisent en même temps des bénéfices en termes de biodiversité et de développement durable des communautés locales
Additionnalité	Démonstration : - gain par rapport à la réglementation existante - existence de barrières à la mise en œuvre du projet (financières liées à la capacité d'investissement, techniques, institutionnelles, ou celles qui sont liées aux incertitudes du marché du bois par exemple) - dépassement des « pratiques courantes »	Démonstration indicative : - gain par rapport à la réglementation existante - existence de barrières à la mise en œuvre du projet (financières, institutionnelles, culturelles)	Démonstration : - gain par rapport à la réglementation existante - projets sont installés sur une perspective de long terme - le projet doit démontrer qu'il ne serait pas viable en l'absence des revenus générés par la vente de crédits.	Démonstration : - gain par rapport à la réglementation existante - existence de barrières à la mise en œuvre du projet (financières, institutionnelles, culturelles)
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	Le projet identifie les risques potentiels et prévoit des mesures pour les compenser
Double compte	Apporter la preuve que les crédits ne sont pas déjà comptés dans l'inventaire national	Projets dans les pays de l'annexe 1 ne sont pas acceptés.	Le standard s'assure auprès des pouvoirs publics du pays où est développé le projet pour celui-ci peut être sorti de l'inventaire national	Le développeur du projet doit spécifier pourquoi il n'y a pas double compte
Nature et méthode de calcul des crédits	Crédits ex-post : observation de la séquestration de carbone dans la forêt	Crédits ex-post : observation de la séquestration de carbone dans la forêt	Dans sa nouvelle version CFS permet aux porteurs de projets de vendre leurs crédits par anticipation (ex ante) et ex post	Pas de crédits
Echéancier et détails sur l'attribution des crédits	Crédits reçus après chaque vérification (au moins tous les 5 ans). La partie des crédits mise en réserve diminue à chaque vérification du bon déroulement du projet La totalité des crédits mis sur le marché ne doit pas dépasser la moyenne accumulée du stock de bénéfices durant la période durée de rotation forestière.	80 % des crédits reçus après chaque vérification annuelle. Les 20 % mis en réserve sont rendus après la période d'engagement.	70 % des crédits reçus après certification du projet. Les 30 % mis en réserve seront rendus suite aux vérifications successives	Pas de crédits
Autres informations pertinentes	Le VCS demande également une évaluation des impacts positifs et négatifs qui pourront résulter de la mise en œuvre du projet. Les projets peuvent et en général cherchent à avoir une certification jointe avec le CCBS standard. Les projets doivent pouvoir être mis en œuvre sur au moins 20 ans.		Les projets doivent pouvoir être mis en œuvre sur au moins 30 ans. Les projets peuvent être doublement certifiés par le CCBS et le Forest Stewardship Council (FSC) sans demander une double documentation.	Les projets doivent générer des impacts sociaux et économiques positifs. Les projets sont soumis à une période de 21 jours de consultation publique.

Source : CDC Climat Recherche.

II. LE POTENTIEL DE DIFFERENTS PROJETS DE SEQUESTRATION SUR LE TERRITOIRE FRANÇAIS

Cette partie présente sept projets fictifs d'augmentation de la séquestration du carbone ou de réductions des émissions dans la filière forêt-bois : deux projets de boisement, trois projets de gestion sylvicole améliorée, et deux projets liés à l'utilisation du bois. Les idées des projets émergent de la littérature ou des initiatives qui ont été mis en place ou qui sont projetées par des acteurs de la filière forêt-bois.

Pour chacun des projets, nous présentons :

- 1) Les caractéristiques techniques du projet-type, et le scénario de référence retenu, c'est-à-dire la situation qui prévaudrait en l'absence de mise en œuvre du projet ;
- 2) Une estimation des quantités de carbone séquestrées ou des émissions de GES, dans le projet-type et dans le scénario de référence, au cours du temps, sur la durée de vie du projet ;
- 3) Un bilan de la séquestration de carbone ou des émissions réduites à la fin du projet ;
- 4) Une estimation du nombre des crédits générés par le projet, en nom appuyant sur les méthodologies acceptés dans le cadre du Voluntary Carbon Standard (VCS) pour les stocks forêt et produits bois²⁰.

La séquestration de carbone supplémentaire apportée par chaque projet est estimée, à partir d'un scénario de référence prudent, pour les trois compartiments suivants : stock de carbone en forêt, stock de carbone dans les produits du bois, et émissions de GES évitées par effet de substitution du bois à la place de combustibles ou de matériaux de construction plus émetteurs. Les coefficients et hypothèses permettant de calculer la séquestration sont détaillés en Annexe 1.

Dans une perspective de valorisation de ces tonnes de CO₂e séquestrées²¹, qui sera explorée dans la partie IV, deux compartiments d'un même projet ne passeront pas nécessairement par le même label : un projet de boisement certifié par le VCS peut très bien valoriser de la substitution bois-énergie via les projets domestiques. Enfin, le « potentiel national » de certains de ces projets est estimé en fonction des terres disponibles au niveau national (par exemple, à partir de la surface totale en taillis pour le projet d'amélioration de taillis).

A. Projets de boisement ou de reboisement

Les définitions de la forêt et des activités de foresterie peuvent être très différentes d'un pays à l'autre. Les labels du marché volontaire utilisent souvent les définitions harmonisées retenues lors des négociations du protocole de Kyoto. Par boisement, on entend « conversion par l'action humaine de terres non forestières en terres forestières sur des terrains qui n'avaient pas porté de forêts pendant au moins 50 ans ». Par reboisement, on entend la « conversion par l'action humaine de terres non forestières en terres forestières sur des terrains qui ne portaient pas de forêt à la date du 31 décembre 1989 »²².

Cette règle présente des exceptions pour le Standard Carbon Fix qui dans des cas de force majeure (feux, tempêtes, etc.) accepte forêts récemment perdues comme éligibles pour des projets de reforestation.

Deux projets de boisement sont étudiés ici : une futaie à vocation de bois d'œuvre, et un taillis à courte révolution, à vocation de bois-énergie.

²⁰ VCS a été choisi parce qu'il correspond au standard le plus utilisée pour les projets forestiers selon Hamilton et al. (2010).

²¹ Conversion : 1 tonne de bois = 2 m³ de bois et 1 m³ de bois = 1 tonne de CO₂

²² Décision 16/CMP.1 et LULUCF GPG, sections 4.2.5.1 et 4.2.6.1.

Exemple 1 : Projet de boisement à vocation de bois d'œuvre

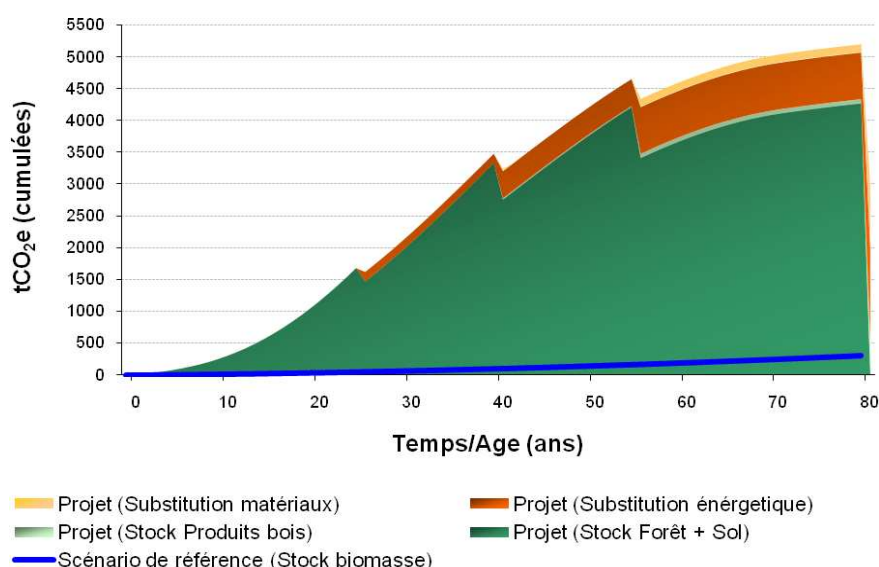
Une association environnementale cherche des partenaires pour transformer des terres en déprise agricole en forêt dans la région PACA. Les caractéristiques générales du projet sont détaillées dans le Tableau 2.

Tableau 2 – Scénarii du projet de boisement à vocation de bois d'œuvre

	Scénario de référence	Scénario de Projet
Surface	10 ha	10 ha
Type de gestion	Friche agricole	Plantation de noyer à vocation de bois d'œuvre. Gestion en futaie.
Production de bois / séquestration de carbone	Nous prenons comme hypothèse, car le calcul n'est pas réalisé, que la friche agricole stocke jusqu'à 33 tCO ₂ e/ha au bout de 80 ans	180 tonnes de bois par ha en 80 ans, soit environ 360 tonnes de CO ₂ par ha.
Bénéfices annexes		En fonction du projet : protection de la biodiversité en diversifiant les essences, restauration du paysage en paysage forestier, possible utilisation en corridor par la faune. Restauration d'un lieu conçu pour la promenade et la recherche de quiétude. Valorisation du bois de haute qualité destiné à l'ameublement.

Source : CDC Climat Recherche d'après Reverchon (2006).

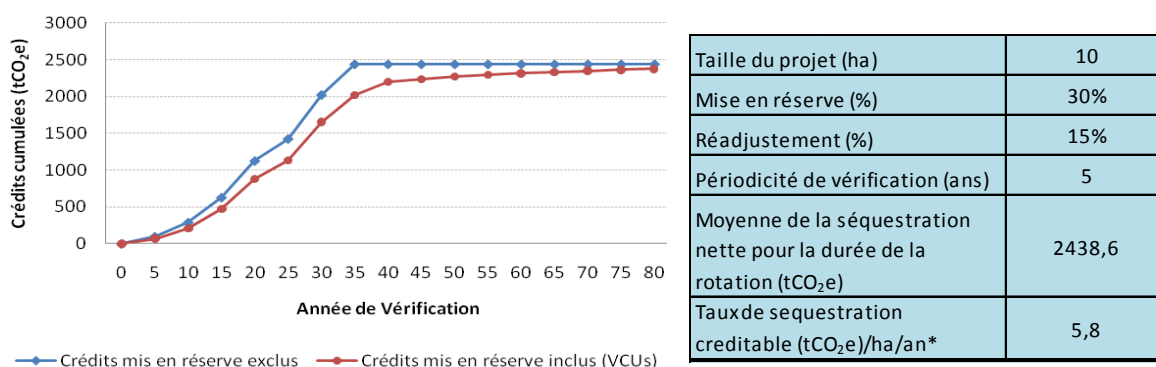
Les calculs de la séquestration carbone dans la forêt et dans les produits bois dans le cycle de projet, ainsi que les effets de substitution sont détaillés en annexe. Une représentation graphique de l'évolution de tels effets dans le temps est faite dans la Figure 7.

Figure 7 - Evolution de la séquestration du projet de boisement à vocation de bois d'œuvre

Source : CDC Climat Recherche.

L'estimation de crédits VCU générés par le projet (cf. Annexe 2) est présentée en Figure 8. Nous observons qu'à partir de l'année 35 le nombre de crédits générés au titre de la séquestration en forêt cesse d'augmenter. Dans le cadre du VCS en effet, un projet ne peut générer plus de crédits que la moyenne temporelle de la séquestration nette pendant la durée de la rotation, et cette valeur est atteinte l'année 35 sur ce projet. Au bout de 40 ans le projet génère 2200 VCUs.

Figure 8 - Estimation du nombre de crédits VCU générés pour le projet de boisement



* calculée sur 20 ans.

Source : CDC Climat Recherche.

Exemple 2 : Projet industriel de reconversion d'une friche agricole en surface boisée

Le projet est porté par une grande entreprise du secteur énergétique qui souhaite produire du bois pour la filière bois-énergie. Les caractéristiques du projet sont détaillées dans le Tableau 3.

Tableau 3 – Scénarii du projet industriel de reconversion d'une terre agricole en surface boisée

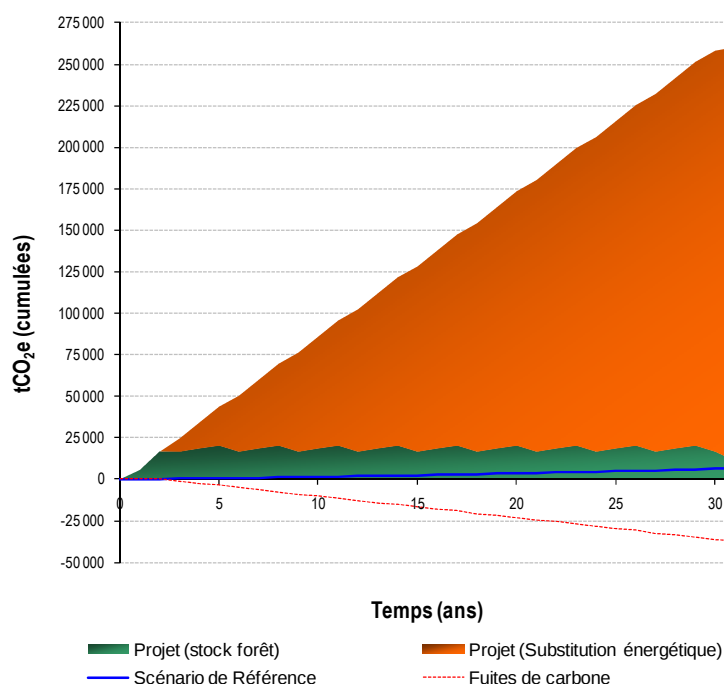
	Scénario de référence	Scénario de Projet
Surface	1000 ha	1000 ha
Essences	Friche agricole	Saule - Essence choisie pour sa forte productivité, et facilité de plantation.
Type de gestion	Néant	Très dynamique, taillis en très courte rotation (TTCR) destiné à la production de plaquettes forestières de petites dimensions.
Production de bois/ séquestration de carbone	Nous prenons comme hypothèse, car le calcul n'est pas réalisé, que la friche agricole stocke jusqu'à 6 tCO ₂ e/ha au bout de 30 ans	Production de 24 tonnes de bois par hectare en 3 ans, soit 48 tCO ₂ e/ha en 3 ans. Important effet de substitution énergétique.
Emissions de carbone	Néant	Emissions non négligeables lors des interventions entre les campagnes de récolte, notamment dues aux intrants et à la préparation du sol.
Bénéfices annexes		Pas de considération pour la biodiversité ou la fonction paysagère de la forêt. Si l'additionnalité est prouvée, elle proviendra du carbone séquestré et du supplément de rentabilité induit par les crédits (et de l'intérêt de valoriser une production de bois énergie).

Source : CDC Climat Recherche.

Les calculs, détaillés en annexe, sont réalisés pour la séquestration du bois sur pied (stock forêt), substitution énergétique et fuites de carbone. Comme le montre la Figure 9, la fréquence des récoltes laisse peu de stock forêt sur pied malgré la grande taille du projet (1000 ha). L'effet de substitution énergétique, par contre, est considérable.

Le projet ne peut pas générer des crédits VCU car selon nos estimations à partir de l'année 15 les émissions de carbone liées à la fertilisation et aux travaux forestiers annulent les crédits qui pourraient être générés dans le stock forêt. Cependant, les effets de substitution énergétique pourraient être valorisés dans un cadre réglementaire mais pas un cadre volontaire du fait du critère de double compte.

Figure 9 - Evolution de la séquestration du projet de reconversion d'une friche agricole en surface boisée



Source : CDC Climat Recherche.

Définition du potentiel national pour la mise en place des projets de boisement et reboisement

Quatre scénarios de politiques nationales de boisement sont analysés pour tester leur réalisme à moyen terme, et déterminer le potentiel de séquestration en tonnes de CO₂e (on ne boisera sans doute pas toutes les terres disponibles, le potentiel total donne donc la fourchette haute) :

- Pol₁ = 10 000 ha/an
- Pol₃ = 30 000 ha/an
- Pol₅ = 50 000 ha/an
- Pol₈ = 80 000 ha/an

La politique Pol₃ correspond au fait à un objectif fixé l'année 2000 par le Programme National de Lutte contre le Changement Climatique (PNLCCC) pour le développement du stockage de carbone dans la forêt, via une relance de la politique de boisement des terres agricoles (doublement du rythme annuel de boisements aidés jusqu'à un niveau de 30 000 ha/an). Barthod (2001), indique également que ce rythme de boisement serait nécessaire pour garantir la régularité de la ressource disponible pour les industries. Les Pol₅ et Pol₈, plus optimistes ont déjà été testées par l'INRA (2002). La Pol₁, la plus pessimiste, montre un boisement de seulement 10 000 ha/an.

Pour tester le réalisme de ces scénarios, nous estimons la quantité de terres disponibles pour faire des boisements. Cette quantité, désagrégée par région, permet également d'estimer la répartition du potentiel national de boisement entre les différentes régions.

Les terres disponibles pour le boisement sont définies à partir de la base de données Teruti-Lucas, qui répertorie les usages des terres en France :

- les friches agricoles sans usage
- les surfaces toujours sur herbe (STH) qui ne sont pas dédiées aux usages agricoles ou d'infrastructure.

Tableau 4 – Estimation des surfaces susceptibles d'être boisées (en hectares)

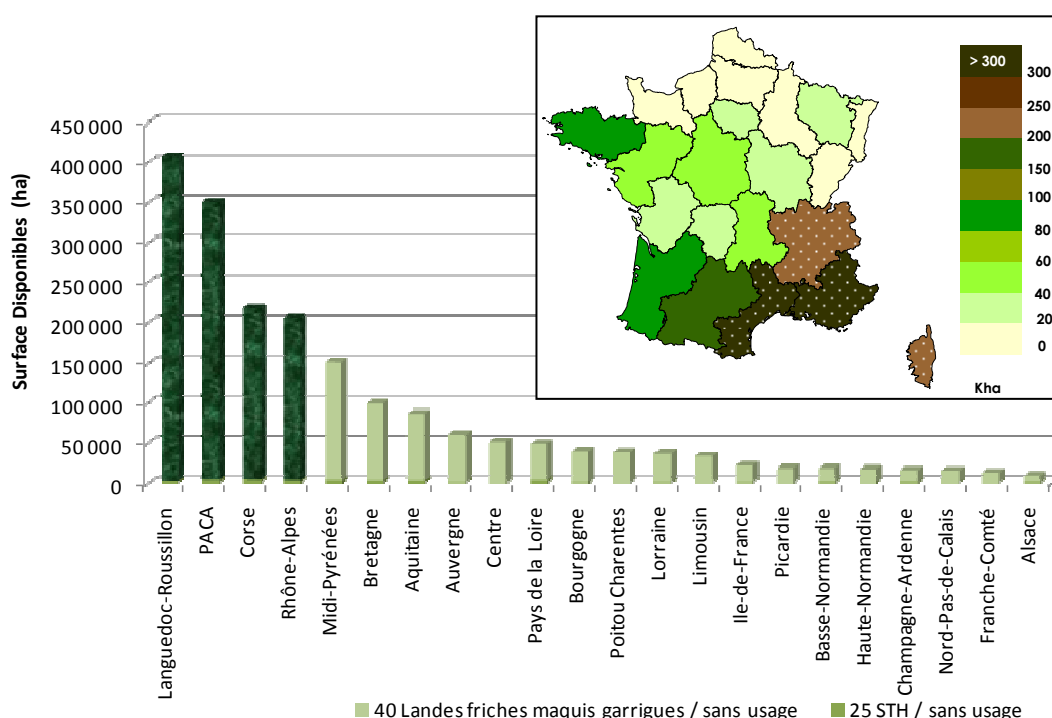
Catégories physiques / sans usage	France Métropolitaine (en ha)
Surfaces Toujours sur herbe (sauf alpages) / sans usage	39 885
Prairies permanentes productives	11 847
Prairies permanentes peu productives	28 038
Landes friches maquis garrigues / sans usage	1 909 958
Landes, friches, maquis, garrigues, savanes	1 617 023
Superficies enherbées naturelles, sans usage	292 935
Potentiel national pour le boisement – reboisement	1 949 842

Entre les différentes terres éligibles nous n'avons pas introduit les surfaces qui sont utilisées dans des activités agricoles, industrielles, urbaines, d'infrastructure et les zones d'intérêt écologique particulier. Nos estimations ne prennent pas en compte les jachères parce que les plantations qui entrent en concurrence directe avec des usages agricoles ne sont en général pas éligibles aux labels de compensation volontaire, et qu'il est difficile de distinguer les jachères qui ont été abandonnées de celles qui font partie d'un régime de production agricole.

Source: CDC Climat Recherche à partir de données du SCESS (Enquête TERUTI 2008).

Deux estimations sont ensuite différenciées : « Optimiste » et « Conservateur ». L'estimation « optimiste » considère l'ensemble des terres précédemment identifiées. L'estimation « conservateur » élimine l'ensemble des « friches » des régions méditerranéennes ou fortement montagneuses (Languedoc-Roussillon, PACA, Corse et Rhône-Alpes). Dans ces régions, la dénomination « friches » ou « garrigues » s'applique en effet à bon nombre de terres qui ne peuvent physiquement pas accueillir une végétation arborée, et qu'il est donc impossible de boisier.

Figure 10 – Distribution régionale des surfaces éligibles pour des projets de boisement



Les régions qui apparaissent en pointillés correspondent aux quatre régions dont les « friches » sont exclues pour l'estimation « conservateur ».

Source: CDC Climat Recherche à partir de données du SCESS (Enquête TERUTI 2008).

Le potentiel national de boisement est ainsi estimé entre 770 000 ha (conservateur) et 1 930 000 ha (optimiste). Le Tableau 5 permet d'estimer le réalisme des scénarios de boisement (Pol₁, ...) au travers du nombre d'années à partir duquel le scénario atteint la quantité de terres disponibles pour le boisement. Les deux scénarios les plus ambitieux (Pol₃ et Pol₅) semblent donc rapidement limités par la quantité de terres disponibles, ce qui met en doute leur réalisme sur une longue durée.

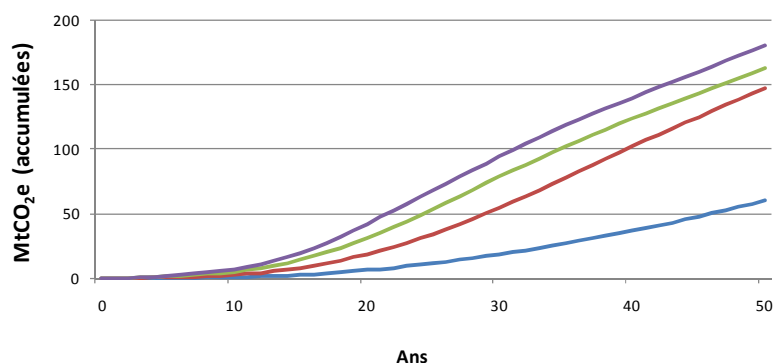
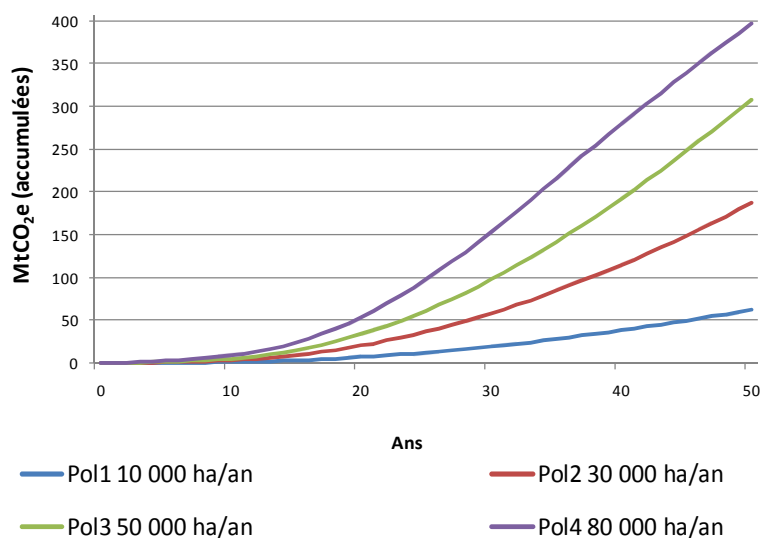
Tableau 5 – Durées limites des scénarios de politiques de boisement

Politiques de boisement	Scénario Optimiste	Scénario Conservateur
Pol ₁ 10 000 ha/an	195	77
Pol ₃ 30 000 ha/an	64	26
Pol ₅ 50 000 ha/an	39	15
Pol ₈ 80 000 ha/an	24	10

Source: CDC Climat Recherche.

La Figure 11 illustre le potentiel national de séquestration par boisement, en se basant sur les rythmes actuels de croissance des forêts européennes qui varient en fonction des différentes classes d'âge et en conservant le rapport entre résineux et feuillus dans chaque région. Avec près de 5 millions de tonnes de CO₂ séquestrées en 20 ans pour le scénario le plus conservateur, soit 1 % des émissions annuelles du pays, le potentiel français est loin d'être négligeable. Plus de détails sur les calculs de ce potentiel sont disponibles en Annexe 3.

Figure 11 – Potentiel de séquestration dans le temps

Scénario conservateur**Scénario optimiste**

Source : CDC Climat Recherche.

B. Projets de gestion sylvicole améliorée

Les projets de gestion sylvicole ont pour objectif d'accroître le stock de carbone dans une forêt exploitée, le plus souvent en conservant, voire en augmentant le volume récolté : le bénéfice « carbone » d'un projet est en effet mesuré conjointement sur les stocks « forêt » et « produits ». Selon la terminologie Kyoto, ce type des projets sont ceux qui sont implémentés dans « les forêts qui restent des forêts ».

Plusieurs types de projets de gestion sylvicole sont envisageables : substitution d'essences, modification des durées de rotation, surdensification des peuplements, conversion d'un taillis en futaie, fertilisation phosphorée, etc. Ces projets ont un impact sur la productivité des forêts et donc sur la capacité de séquestration dans l'écosystème.

Trois exemples de projets sont analysés : la conversion d'un taillis en futaie irrégulière, la surdensification d'une plantation de pin, et la substitution d'essence.

Exemple 3 : Conversion de taillis de châtaigner en futaie irrégulière

Le projet consiste à passer d'un mode de gestion en taillis à une gestion en futaie irrégulière qui porte 200 m³ de bois à l'hectare. L'objectif d'exploitation est fixé à 80 m³/ha tous les 7 ans environ, de sorte que 120 m³ sont laissés sur pied.

Ce mode de gestion permet de produire plus de bois que la gestion en taillis (210 m³/ha en 21 ans au lieu de 160 m³/ha en 20 ans) tout en conservant un stock en forêt supérieur au scénario de référence. Il est néanmoins plus coûteux car il nécessite des interventions plus fréquentes et plus techniques en forêt. Le bois produit par le scénario « projet » étant d'un diamètre moyen supérieur au scénario de référence, le projet délivre plus de bois à la menuiserie, ce qui augmente la durée de vie des produits.

Tableau 6 – Scénarii du projet de conversion de taillis de châtaigner en futaie irrégulière

	Scénario de référence	Scénario de Projet
Surface	800 ha	800 ha
Essences	Taillis de châtaigner	Futaie de châtaigner
Production de bois/séquestration de carbone	160 m ³ /ha au bout de 20 ans avec une séquestration moyenne sur le long terme d'environ 80 tonnes de CO ₂ .	200 m ³ /ha, objectif d'exploitation : 80 m ³ tous les 7 ans, 120 m ³ sont laissés sur pied. La séquestration moyenne sur le long terme est de 160 tonnes de CO ₂ . D'où un stockage additionnel de 80 m ³ /ha en régime permanent.
Emissions de carbone	Les émissions de CO ₂ émises lors des travaux forestiers sont considérées comme négligeables.	Eclaircies ponctuelles. Les émissions de CO ₂ émises lors des travaux forestiers sont considérées comme presque négligeables.
Bénéfices annexes		Pas de diversité d'essences mais le peuplement irrégulier est favorable au passage de la faune (corridor). Il est souvent préféré d'un point de vue paysager.

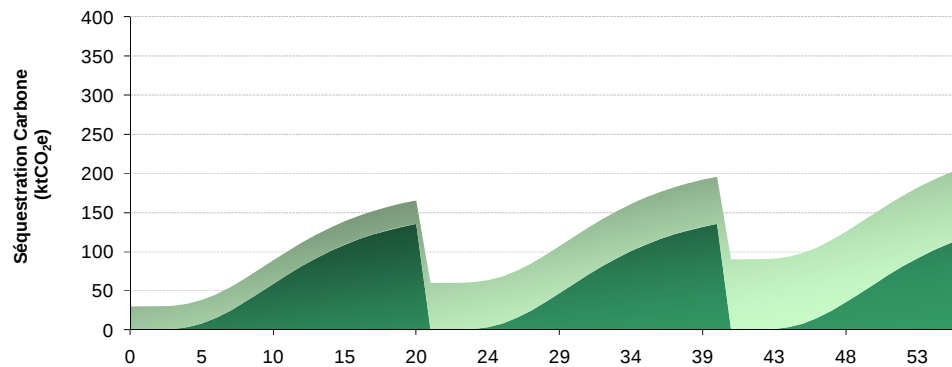
Source : CDC Climat Recherche.

Les calculs sont réalisés pour la séquestration du bois sur pied (stock forêt), la prolongation du stockage dans les produits bois et la substitution matériaux. Comme le montre la Figure 12, le stock en forêt est augmenté dans le scénario du projet, ainsi que le stock dans les produits bois.

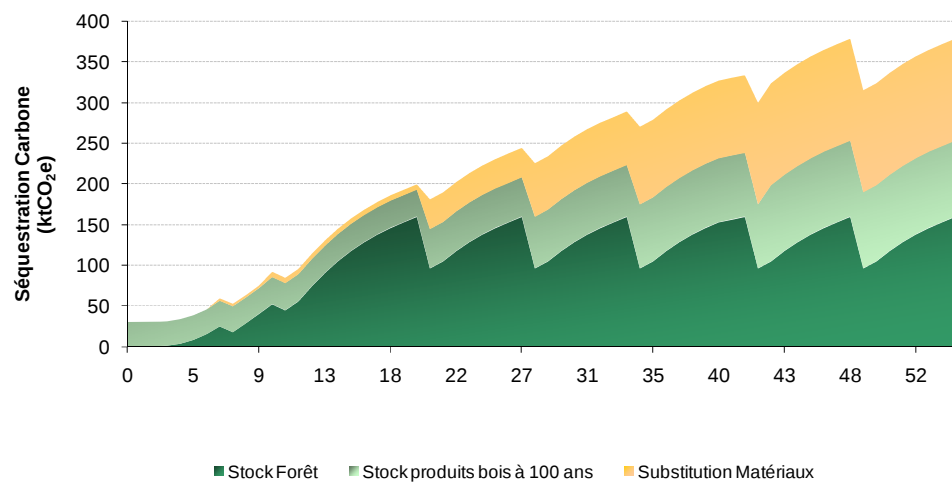
L'effet de substitution de matériaux est pris en compte à fins d'illustration car le châtaigner n'est pas très utilisé en pratique pour la production de poutres. La récolte du taillis, étant en intégrité destinée à la production du bois d'industrie ne peut pas être destinée à ce type d'usage.

Figure 12 – Evolution de la séquestration carbone du projet de conversion de taillis en futaie irrégulière

Scénario de référence



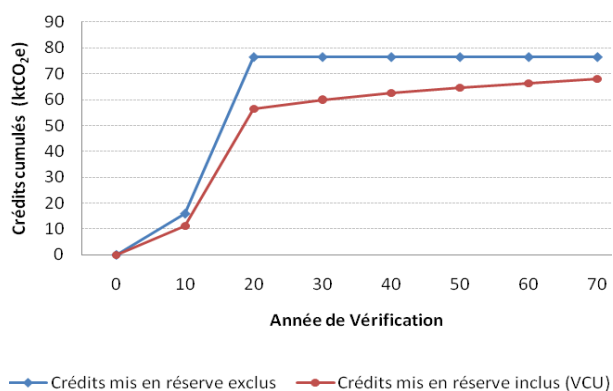
Scénario projet



Source : CDC Climat Recherche.

La Figure 13 présente la quantité de crédits VCS générés par le projet, qui cesse de croître au bout de 20 ans, pour la même raison que le projet 1. L'année 20 le nombre de crédits générés par le projet s'élève à 56 000 VCU, une fois décomptés les crédits mis en réserve. De plus, si des vérifications ont lieu dans les années suivantes et confirment que les risques associés au projet ont été contrôlés, le projet peut générer jusqu'à 62 500 crédits VCU à la fin de l'année 40 une fois décomptés les crédits mis en réserve.

Figure 13 – Estimation du nombre de crédits VCU générés pour le projet conversion de taillis en futaie irrégulière



Taille du projet (ha)	800
Mise en réserve (%)	30%
Réajustement (%)	15%
Périodicité de vérification (ans)	10
Moyenne de la séquestration nette pour la durée de la rotation (ktCO ₂ e)	76,6
Taux de séquestration creditable (tCO ₂ e)/ha/an*	3,5

* calculée sur 20 ans.

Source: CDC Climat Recherche.

Exemple 4 : Projet de surdensification

La surdensification est une technique de gestion forestière qui permet un accroissement de la production de bois lors de la phase initiale de croissance du peuplement. Ce projet fictif associe une grande entreprise énergétique à une coopérative forestière. L'objectif est d'augmenter la productivité d'une forêt de pins maritimes en ajoutant régulièrement une rangée de pins dans la plantation qui sera coupée au bout de huit ans pour alimenter la filière bois – énergie (Tableau 7).

Tableau 7 – Scénarii du projet de surdensification

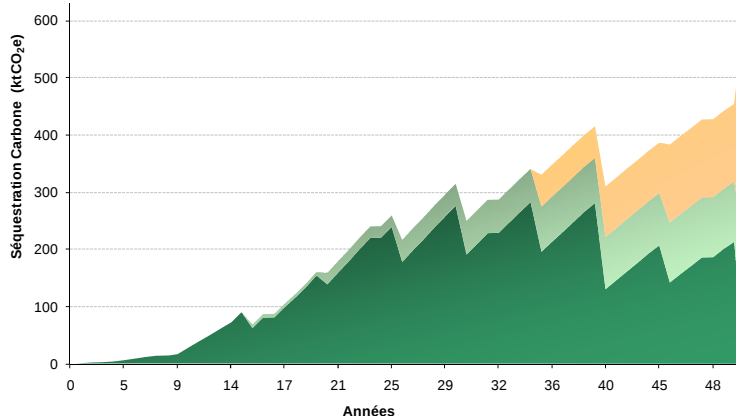
	Scénario de référence	Scénario de Projet
Surface	1000 ha	1000 ha
Essences	Pin maritime	Pin maritime
Type de gestion	Plantation du Pin Maritime	Plantation sur densifié de pin maritime
Production de bois/ séquestration de carbone	Séquestration dans la forêt par la plantation de conifères jusqu'à la coupe rase. Production totale de 622m ³ /ha de bois lors de tout le cycle du projet	Production de 622m ³ /ha de bois lors de tout le cycle du projet à laquelle s'ajoutent 14 m ³ bois /ha au bout de huit ans, soit 14 t de CO ₂ /ha.
Emissions de carbone	Travaux sylvicoles (négligeables)	Travaux sylvicoles (négligeables)
Bénéfices annexes		Néant

Source : CDC Climat Recherche.

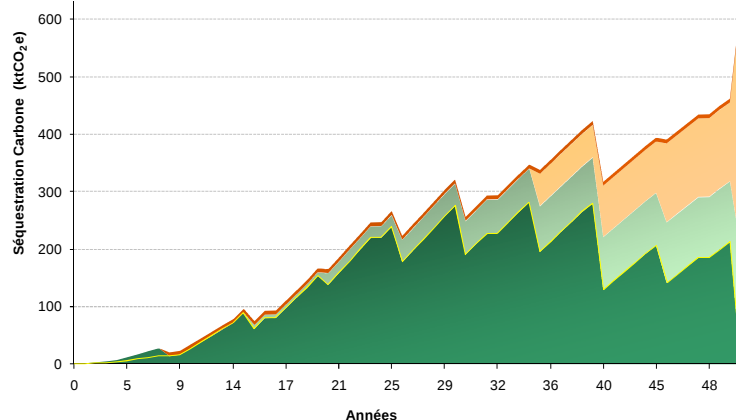
La Figure 14 montre l'évolution de la séquestration carbone dans les différents compartiments pour le scénario de référence et le scénario projet. On observe une légère augmentation du stock forêt ainsi qu'une contribution réduite du compartiment bois-énergie.

Figure 14 – Evolution de la séquestration carbone du projet de surdensification

Scénario de référence



Scénario projet

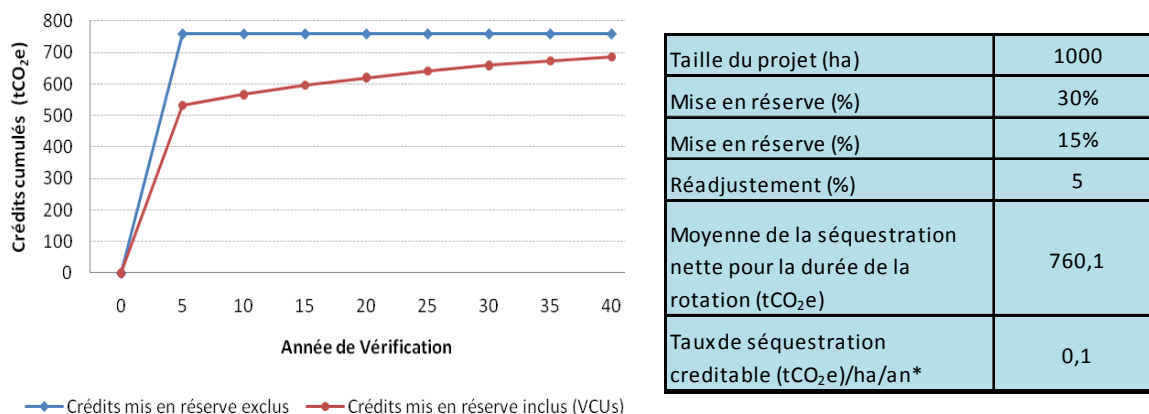


■ Substitution Energétique
■ Stock Produits Bois à 100 ans
■ Stock Forêt (Scénario de référence)
■ Substitution Matériaux
■ Stock Forêt

Source : CDC Climat Recherche.

La Figure 15 présente l'estimation des crédits générés pour le projet sur l'hypothèse que les vérifications sont réalisées tous les 5 ans. Le projet dans son ensemble va générer un total de 700 VCUs (crédits mis en réserve inclus) à un horizon de 40 ans.

Figure 15 – Estimation du nombre de crédits VCU générés pour le projet de surdensification



* calculée sur 5 ans.

Source : CDC Climat Recherche.

Exemple 5 : Projet de changement d'essences

Dans le milieu forestier, l'adaptation au changement climatique se traduira notamment par un changement des choix d'essences. Le hêtre par exemple risque de d'être supplanté par le chêne sur la majeure partie du territoire. Mais les choix d'essences peuvent aussi impacter la capacité de séquestration carbone d'un peuplement au travers des facteurs suivants : 1) Vitesse de croissance; 2) Densité du bois ; 3) Patrons d'enracinement ; 4) Durée de vie ; 5) Vulnérabilité aux perturbations naturelles.

Le scénario « projet » consiste ici en l'utilisation d'une essence de pin maritime plus productive que celle utilisée dans le scénario de référence. Cette substitution d'essence augmente à la fois le stock en forêt et stock dans les produits du bois, par une augmentation du bois utilisable en tant que bois d'œuvre.

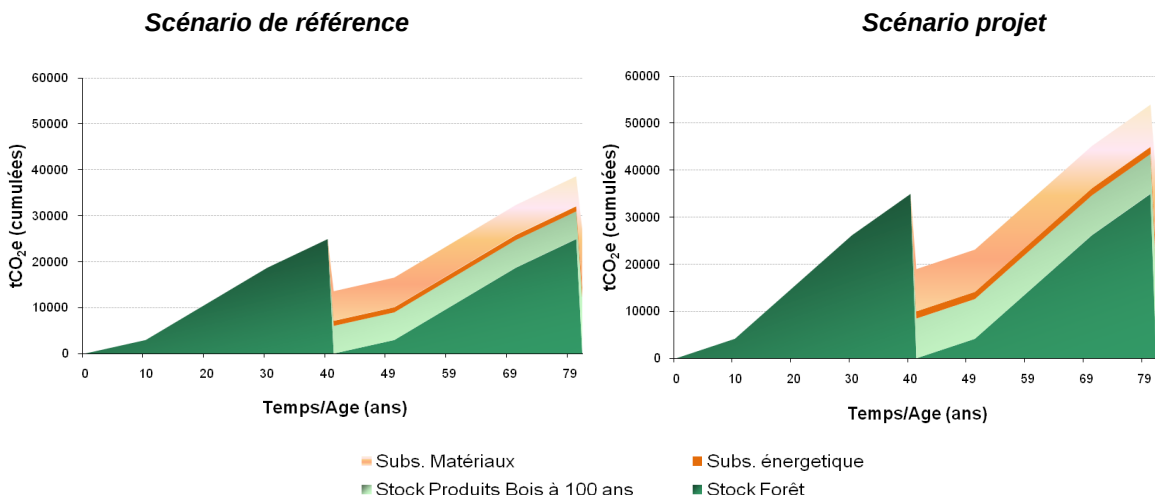
Tableau 8 – Scénarii du projet de changement d'essences

	Scénario de référence	Scénario de Projet
Surface	100 ha	100 ha
Essences	Pin maritime	Pin maritime plus productif (amélioration génétique)
Type de gestion	Rotation sur 40 ans coupe rase	Rotation sur 40 ans avec coupe rase
Production de bois/ séquestration de carbone	Objectif bois d'œuvre : 230 tiges/ha 250 m ³ / ha en 40 ans, soit 250t CO ₂ / ha	Objectif bois d'œuvre : 230 tiges/ha 350 m ³ / ha en 40 ans, soit 350 t CO ₂ / ha
Emissions de carbone	Considérées comme négligeables	Considérées comme négligeables
Bénéfices annexes		Néant

Source : CDC Climat Recherche.

La Figure 16 illustre la quantité de tonnes de CO₂ séquestrées par le projet, dans les différents compartiments.

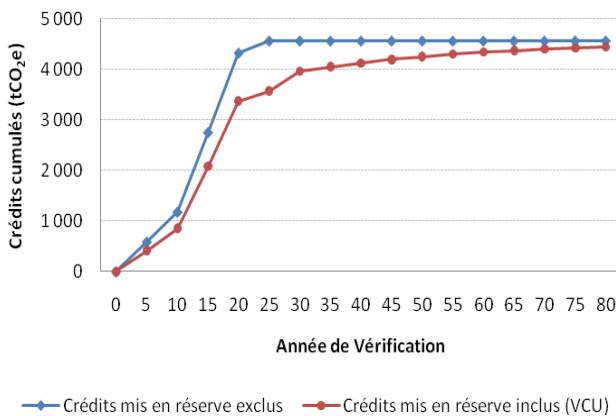
Figure 16 – Evolution de la séquestration carbone du projet de changement d'essences



Source : CDC Climat Recherche.

La Figure 17 présente l'évolution de la quantité de VCU générés par le projet. Au bout de 40 ans, le projet génère environ 3400 VCU (crédits mis en réserve inclus).

Figure 17 – Estimation du nombre de crédits VCU générés par le projet de changement d'essences



Taille du projet (ha)	100
Mise en réserve (%)	30%
Réajustement (%)	15%
Périodicité de vérification (ans)	5
Moyenne de la séquestration nette pour la durée de la rotation (tCO ₂ e)	4572,4
Taux de séquestration creditable (tCO ₂ e)/ha/yr*	1,4

* calculée sur 5 ans.

Source : CDC Climat Recherche.

Définition du potentiel national pour la mise en place des projets de gestion sylvicole

Notre estimation du potentiel national pour la conversion de taillis en futaie s'appuie sur les ordres de grandeur proposés par Barthod (Tableau 9). Les catégories qui nous concernent sont les taillis à transformer, c'est-à-dire ceux nécessitant une coupe suivie de replantation, et les taillis à améliorer, c'est-à-dire ceux qui peuvent être transformés sans coupe rase.

D'après Barthod (2001) 3,64 millions d'hectares de forêts sont susceptibles d'être enrichis à travers des projets de conversion et amélioration des taillis et des taillis sous futaie, soit 27 % des forêts françaises. Ces estimations sont cohérentes avec le potentiel de 30 % de la forêt française trouvé par De Galbert (2007). Les objectifs annuels de transformation et d'amélioration de taillis donnés par Barthod (Tableau 10) ne semblent pas irréalistes au vu de ce large potentiel (Tableau 11).

Tableau 9 – Surfaces susceptibles d'être enrichies par conversion, transformation et amélioration de la gestion sylvicole

Interrégion forestière	Superficies en France ⁽¹⁾ en hectares						Superficies en taillis susceptibles d'être enrichies en hectares ⁽²⁾				
	Futaie Feuillus (A)	Futaie Conifères (B)	Taillis Feuillus (C)	Mélange de futaie et taillis Feuillus (D)	Mélange de futaie et taillis Conifères (E)	Total (A) + (B) + (C) + (D) + (E)	Conversion en futaie de (C) + (D) + (E)	% conv.	Amélior. par plantation de (C) + (D) + (E)	% Amélior.	% total
Massif central et Alpes du Nord	578 425	976 505	414 632	377 071	172 277	2 518 911	140 000	15%	250 000	26%	15%
Nord-Est	964 934	768 947	175 057	1 399 383	74 022	3 382 343	340 000	21%	1 130 000	69%	43%
Nord-Ouest	925 016	444 790	421 382	904 108	138 744	2 834 040	260 000	18%	860 000	59%	40%
Sud-Est	223 393	877 358	602 969	68 368	227 120	1 999 208	50 000	6%	130 000	14%	9%
Sud-Ouest	632 951	1 093 107	450 964	513 829	139 285	2 830 137	350 000	32%	130 000	12%	17%
France métropolitaine	3 324 719	4 160 708	2 065 004	3 262 760	751 448	13 564 638	1 140 000	19%	2 500 000	41%	27%

Interrégions forestières utilisées par Barthod (2001) et identifiées par les pouvoirs publics et fédérations professionnelles : Massif central et Alpes du Nord (Limousin, Auvergne et Rhône Alpes), Nord-Est (Champagne-Ardenne, Lorraine, Alsace, Bourgogne et Franche Comté) Nord-Ouest (Haute Normandie, Basse Normandie, Bretagne, Poitou Charentes, Centre, Nord-Pas de Calais, Picardie et Île de France), Sud-Est (Provence-Alpes-Côte d'Azur et Languedoc - Roussillon) et Sud-Ouest (Aquitaine et Midi-Pyrénées).

Source : CDC Climat Recherche à partir des données: ⁽¹⁾ Résultats Inventaires Forestiers Départementaux entre 1989 et 2004 centralisés par l'IFN et ⁽²⁾ Barthod(2001).

Tableau 10 – Objectifs prioritaires de conversion et amélioration

	Taillis et taillis- sous-futaie à transformer (ha/an)	taillis-sous- futaie à améliorer (ha/an)	Futaies dégradées à reboiser (ha/an)	Boisement des terres agricoles (ha/an)
Nord-Ouest	3 500	3 600	200	4 800
Nord-Est	8 500	8 000	-	800
Massif central et Alpes du Nord	3 400	3 300	1 500	1 000
Sud-Est	1 900	1 100	-	500
Sud-Ouest	4 000	1 100	2 500	2 400
France métropolitaine	21 300	17 100	4 200	9 500

Ces objectifs ont été précisés par Barthod (2001) en fonction des moyens financiers et humains mobilisables, définis d'après des discussions au niveau régional et local. Nous observons comment l'objectif de boisement des terres agricoles correspond à un peu près à 10 000 ha/an, ce qui correspond à l'une des politiques de boisement testées dans la section précédente.

Source : Barthod (2001).

Tableau 11 – Durée des programmes interrégionaux d'amélioration de la gestion sylvicole (ans)

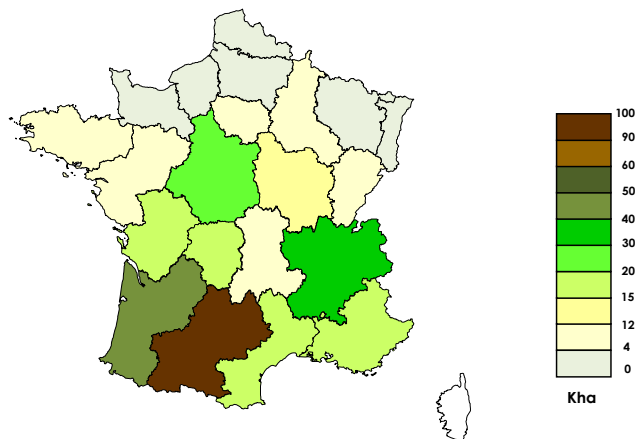
	Conversion en futaie régulière ou irrégulière (ans)	Amélioration de taillis et taillis-sous- futaie (ans)
Massif central et Alpes du Nord	41	76
Nord-Est	40	141
Nord-Ouest	74	239
Sud-Est	26	118
Sud-Ouest	88	118

Source: CDC Climat Recherche d'après Barthod (2001).

Pour les projets de conversion de taillis en futaie

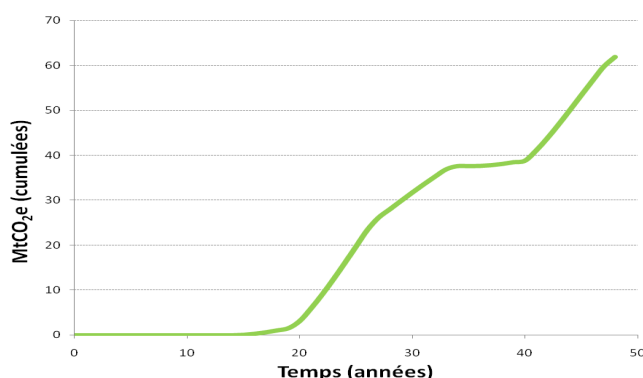
Sur l'hypothèse de conversion en futaie au niveau national de 19 % des surfaces en taillis et taillis sous futaie la répartition régionale de ce potentiel, illustrée dans la Figure 18, est estimée à partir de la surface régionale en taillis.

Figure 18 – Distribution régionale du potentiel de conversion de taillis en futaie



Source : CDC Climat Recherche à partir des données : ⁽¹⁾ Résultats Inventaires Forestiers Départementaux entre 1989 et 2004 centralisées par l'IFN et ⁽²⁾ Barthod (2001).

Figure 19 – Potentiel de séquestration dans le temps (additionnelle au scénario de référence)



Source : CDC Climat Recherche.

Sur la base du rythme de conversion annuel de 21 300 ha, le potentiel national de ce type de projet de conversion atteint 20 MtCO₂ sur 25 ans.

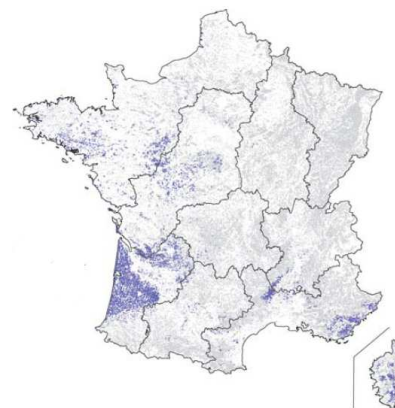
Pour les projets de surdensification

L'évaluation du potentiel national de ce type de projets est réalisée à partir de la répartition géographique du pin maritime qui est concentré principalement dans la région Aquitaine. D'après nos informations, 100 000 has dans la région sont éligibles pour le projet ce qui permettrait à moyen terme la séquestration de 70 ktCO₂e (sur un rythme de densification de 5000 ha/an).

Figure 20 – Distribution régionale du pin maritime (pinus pinaster) et potentiel pour la surdensification

Cette essence est spontanée sur les côtes de l'océan Atlantique et de la Méditerranée. On la trouve en France dans le massif forestier des Landes de Gascogne (massif landais du Sud-ouest), mais également sur la côte méditerranéenne, en Bretagne, en Sologne et dans la vallée de la Loire. C'est l'essence qui possède la meilleure production brute annuelle avec 11,1 millions de m³ par an.

Source: CDC Climat Recherche à partir des données de l'IFN et de GDF-Suez, COFELY.



C. Projets « produits du bois »

Exemple 1 : Projet de changement d'usages de bois

Un premier exemple de projet consiste à modifier l'affectation du bois produit en région Aquitaine vers des produits à durée de vie longue. Ce projet est inspiré d'une étude publiée par Malfait et al. en 2008. Pour simplifier les calculs, ce projet fait l'hypothèse que la forêt aquitaine est à l'équilibre, avec notamment un stock en forêt et une quantité récoltée constants. Les caractéristiques de ce projet sont données par le Tableau 12.

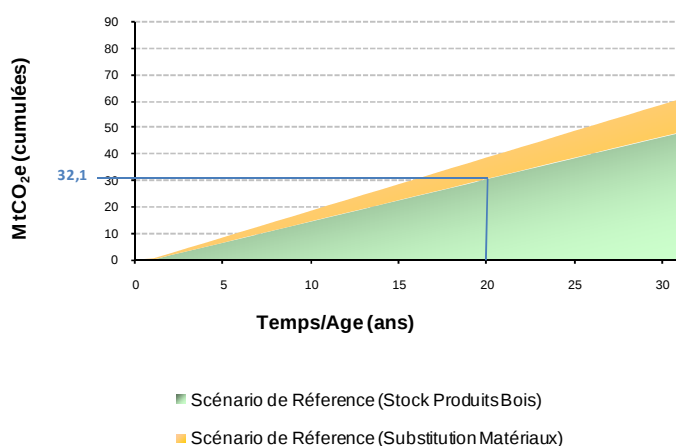
Tableau 12 – Scénario du projet de changement d'usages en bois²³

	Scénario de référence	Scénario de Projet
Répartition d'usages de bois	7,5 % de la récolte dans la région sont destinés au bois de construction (0,66 Mm³)	20 % de la récolte dans la région sont destinés au bois de construction (1,76 Mm³) Cette augmentation se fait au détriment du poste emballage (Bois d'industrie).
Type de gestion	Récolte dans la région sans modifications.	Objectif : favoriser l'affectation de la récolte à des produits-bois ayant une longue durée de vie. Séquestration de carbone plus longue dans les produits bois dans la construction et modification de l'effet de substitution bois-matériau.
Production de bois/ séquestration de carbone	Dans les produits bois issus de la récolte dans la région : 32,1 MtCO ₂ (au bout de 20 ans)	Séquestration de carbone de la récolte une fois que la redistribution est menée : 34,6 MtCO ₂ (au bout de 20 ans) soit 2.5 MtCO ₂ additionnelles
Autres émissions évitées (substitution)	Substitution matériaux (utilisation du bois en substitution d'autres matériaux plus émetteurs en CO ₂): 8,1 MtCO ₂ (au bout de 20 ans)	Substitution matériaux (utilisation du bois en substitution d'autres matériaux plus émetteurs en CO ₂): 18,2 MtCO ₂ (au bout de 20 ans)
Bénéfices annexes		Néant.

Source : CDC Climat Recherche d'après Malfait et al. (2008).

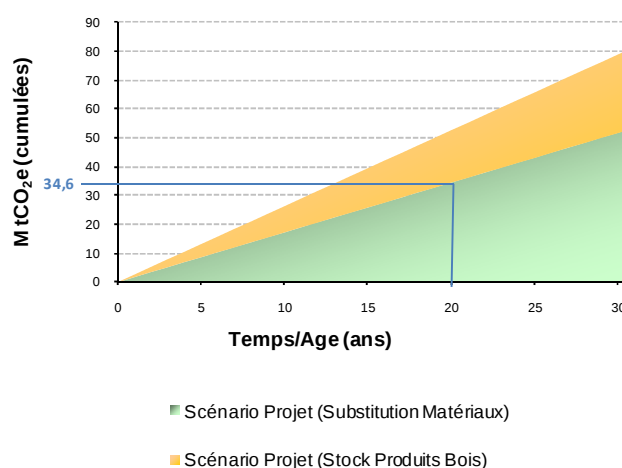
Figure 21 – Evolution de la séquestration carbone du projet de changement d'usage de bois²⁴

Scénario de référence



²³ Les fuites de carbone non pas été considérés dans nos calculs, ce qui pourrait réduire le nombre des crédits générés. Nous n'avons pas une certitude que les matériaux qui viendront substituer le bois d'emballage n'émettraient plus de carbone que le scénario de référence.

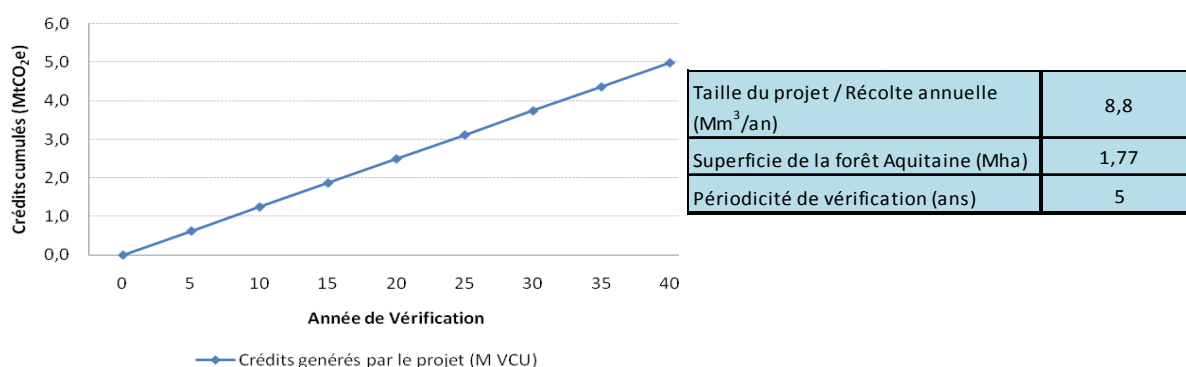
²⁴ Le stock forêt et l'effet de substitution énergétique ne sont pas présentés sur la figure car ils ne sont pas modifiés par le projet (cf. Annexe 1 – Méthodologie des calculs réalisés : exemple du projet de boisement à vocation de bois d'œuvre).

Scénario projet

Source : CDC Climat Recherche d'après Malfait et al. (2008).

La Figure 22 présente l'évolution de la quantité de VCU générés par le projet. Au bout de 40 ans, le projet génère 4,5 millions de VCU. Comme ce projet se concentre uniquement dans les produits bois, nous considérons que le pourcentage de crédits à mettre en réserve est négligeable.

Figure 22 – Estimation du nombre de crédits VCU générés pour le projet d'usages du bois



Source : CDC Climat Recherche.

Exemple 2 : Projet d'augmentation de la récolte

Un autre exemple de projet consiste à augmenter la récolte de bois en région Lorraine pour augmenter le stockage vers des produits bois, à partir de la mobilisation de peuplements conifères. Ce projet est inspiré d'un des objectifs du Grenelle de l'environnement qui propose l'augmentation de la récolte de 20 Mm³/an à l'horizon 2020. Une hypothèse conservatrice est prise ici : cet objectif sera atteint à seulement 70 % et ce dans un horizon deux fois plus long, ce qui représenterait pour la Lorraine²⁵ un objectif d'augmentation de la récolte de 1,1 Mm³/an au bout de 20 ans.

Le calcul repose sur l'hypothèse simplificatrice qu'une partie de la forêt lorraine est inexploitée, tandis que l'autre est à l'équilibre entre accroissement naturel et récolte. Une fois le projet mis en œuvre, un nouvel équilibre est atteint dans lequel la partie exploitée de la forêt Lorraine est augmentée de 0,8 millions d'hectares qui permettent de répondre à l'objectif annuel de récolte (voir annexe).

Les caractéristiques de ce projet sont données par le Tableau 13.

²⁵ La récolte en Lorraine représente 8% de la récolte nationale.

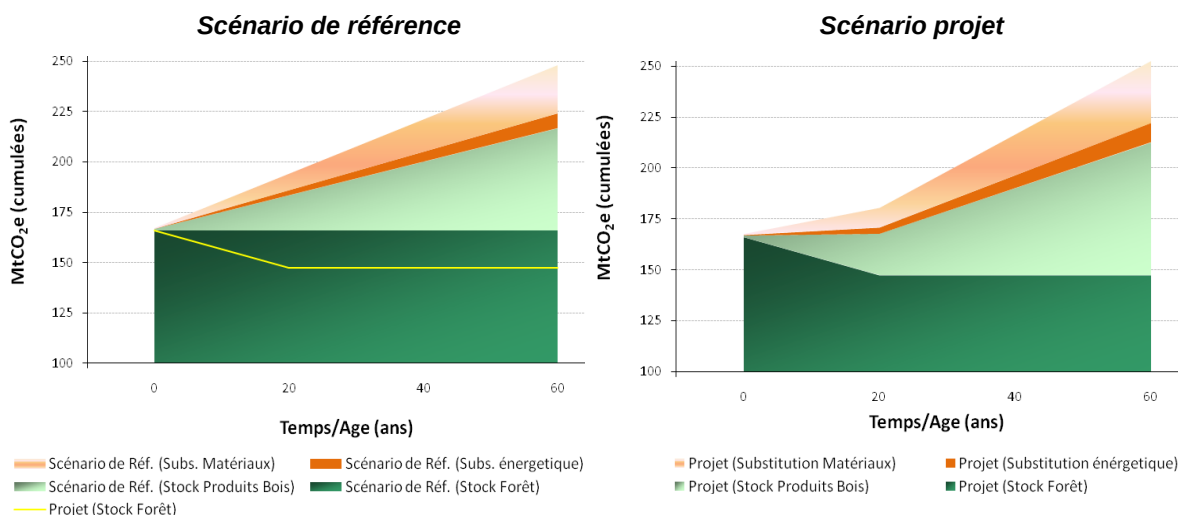
Tableau 13 – Scénarii du projet d'augmentation de la récolte

	Scénario de référence	Scénario de Projet
Niveau de récolte	Récolte annuelle dans la région: 3,2 Mm³ Stock forêt 166 Mm³	Augmentation graduelle de la récolte régionale jusqu'à atteindre un niveau annuelle 4,3 Mm³ en 2030.
Type de gestion	Récolte dans la région sans modifications	Objectif : Mobilisation de la forêt (résineux matures) et prolongation du stockage de carbone dans les produits bois.
Production de bois/ séquestration de carbone	Dans la forêt et les produits bois issus de la récolte dans la région.	Stock réduit dans la forêt et augmenté dans les produits bois. Effets de substitution (matériaux et énergie) accentués.
Bénéfices annexes		Néant.

Source : CDC Climat Recherche.

La Figure 23 présente l'impact du projet sur les différents compartiments. A court et moyen terme, même si la hausse de la récolte conduit à des augmentations de stock dans les produits bois et par effets de substitution énergétique et de matériaux, celles-ci ne suffisent pas à compenser la réduction du stock en forêt. Le résultat agrégé de ces quatre effets est inférieur à celui du scénario de référence dans un ordre de 7 % et de 2 % pour un horizon de 40 ans. Néanmoins, à long terme (60 ans) ce résultat est supérieur à celui du scénario de référence de 1,8 %.

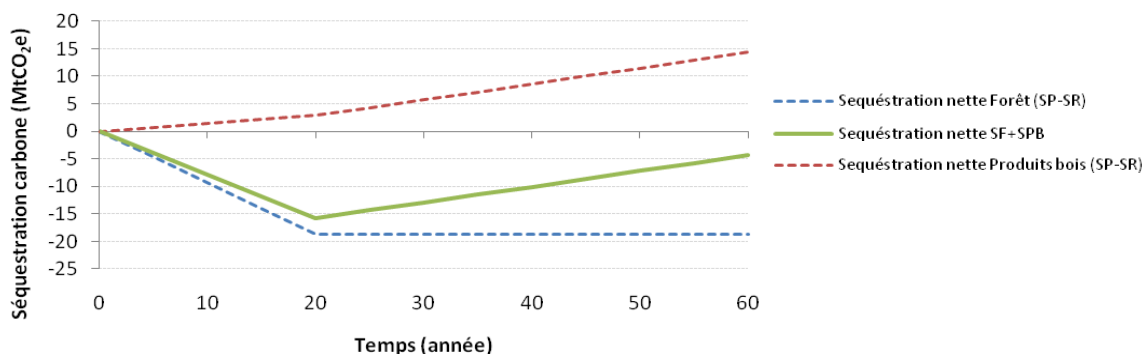
Figure 23 – Variations de stock et effets de substitution du projet d'augmentation de la récolte



Source : CDC Climat Recherche.

Le projet ne peut pas tirer des bénéfices liés à la vente de crédits VCS car le résultat agrégé de la comptabilité nette (scénario de projet – scénario de référence) des stocks forêt et produits bois est négatif pendant toute la durée du projet comme le montre la Figure 24.

Figure 24 – Séquestration nette du projet dans les compartiments forêt et produits bois



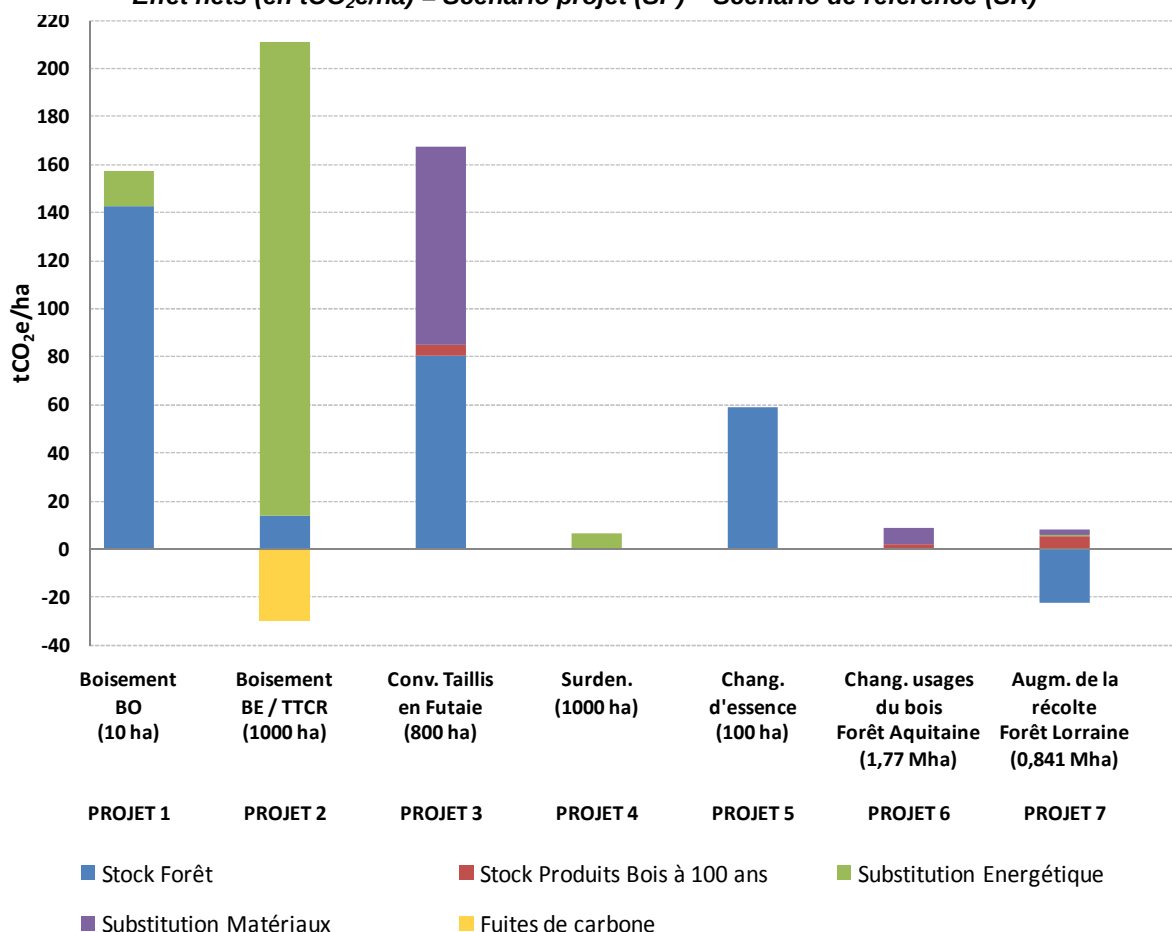
Source : CDC Climat Recherche.

D. Combien de carbone à 25 ans ?

L'analyse a été réalisée pour 7 projets assez hétérogènes, qui varient dans leur taille, localisation, vocation productive et itinéraire sylvicole. Même s'ils ne sont pas directement comparables les uns aux autres, car chacun entraînerait différents coûts d'investissement, mesures d'organisation, etc., il est possible de comparer les effets de séquestration et substitution de chaque projet à un horizon de 25 ans.

Figure 25 – Comparaison de la séquestration / substitution carbone à 25 ans

Effet nets (en tCO₂e/ha) = Scénario projet (SP) – Scénario de référence (SR)²⁶



Source : CDC Climat Recherche.

La Figure 25 synthétise la séquestration nette de carbone de chacun des projets, rapportée à l'hectare, au bout de 25 ans. En ce qui concerne les effets valorisables dans le marché volontaire, ce sont les projets 1, 3 et 5 qui présentent les effets les plus intéressants en termes d'augmentation du stock forêt et les projets 3 et 6 dans les produits bois.

Le projet 1 permet d'obtenir une hausse nette du stock forêt plus élevée que celle des projets 3 et 5 (respectivement +62 tCO₂e/ha et +83,5 tCO₂e/ha). En revanche, il est possible que le projet 1 requière des coûts d'investissement et d'opérations plus élevés que le projet 3.

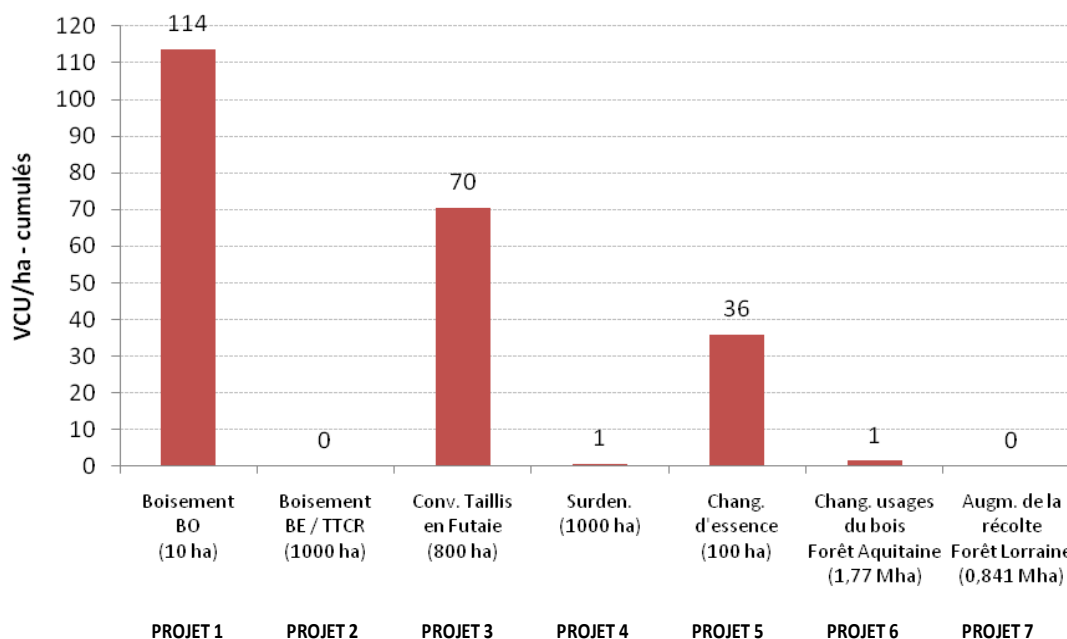
Le deuxième projet fournit l'impact agrégé le plus important. Celui-ci est cependant réduit de 15 % par les émissions de gaz à effet de serre liés aux travaux et aux engrais. Par ailleurs, la valorisation de ce projet dans un cadre volontaire s'avère difficile : l'important effet de substitution énergétique ne peut pas être valorisé dans le marché volontaire, et l'augmentation du stock en forêt ne compense pas les émissions de gaz à effet de serre du projet.

²⁶ Les deux derniers projets ont été pondérés selon la taille de la forêt régionale où ils seraient développés, même si celle-ci ne représente pas la surface de forêt mobilisée par les projets. Cette démarche permet de comparer ces deux projets réalisés à très grande échelle.

Le dernier projet ne présente pas des bénéfices carbone à 25 ans. La hausse du stock dans les produits-bois, ajoutée aux effets de substitutions, ne compense que 38 % de la baisse du stock en forêt. On peut néanmoins rappeler que cette conjoncture s'inverse au bout d'une cinquantaine d'années.

La Figure 26 traduit ces chiffres en quantité de crédits carbone. Elle montre que les projets 1, 3 et 5 sont ceux qui à un horizon de 25 ans génèrent le plus de crédits par hectare. Comme indiqué auparavant, les projets 2 et 7 ne génèrent aucun crédit VCU. Ramené à l'hectare, le nombre de crédits produits par le projet 6 devient presque négligeable. Mais vu qu'il s'agit d'un projet à grande échelle, il atteint néanmoins 2,6 M VCU au bout de 25 ans.

Figure 26 – Comparaison du nombre de crédits générés par chaque projet à 25 ans (crédits mis en réserve inclus)



Source : CDC Climat Recherche.

III. PERSPECTIVES DE LABELLISATION

A. Les projets forestiers face aux critères de labellisation « carbone »

Après la quantification de la séquestration de carbone réalisée par chaque exemple de projet se pose la question de la labellisation « carbone ». Afin de déterminer si celle-ci est possible, et d'identifier le standard le plus approprié à chaque projet, ces derniers sont examinés à l'aune des trois grands critères de labellisation exposés en section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** : additionnalité, permanence et double-compte.

Les projets de boisement

Projet de boisement à vocation de bois d'œuvre

Prenons l'exemple du projet de boisement à vocation de bois d'œuvre en région PACA. On ne s'intéresse ici qu'à la certification carbone de l'augmentation du stock en forêt, l'augmentation du stock dans les produits-bois arrivant relativement tard dans le déroulement du projet. La petite surface concernée fait qu'il n'est absolument pas rentable, même avec l'utilisation de crédits carbone (cf. analyse économique en partie III.C). Pour une taille plus réaliste de 100 ha, ce projet n'est pas rentable par la seule vente du bois, mais le devient si des crédits carbone correspondant à la séquestration en forêt sont vendus. Cette non-rentabilité rend le projet éligible à tous les standards du point de vue de l'additionnalité.

Le projet de boisement à vocation de bois d'œuvre a un solde de séquestration positif sur l'ensemble de sa durée. En ce qui concerne la permanence, le type de gestion est « conservateur » puisque l'objectif est de laisser les arbres sur pied le plus longtemps possible. Pour essayer de réduire la vulnérabilité aux risques associés aux incendies ou tempêtes, le choix des terrains est fondamental et un système d'assurance est imposé par les labels (la plupart prévoient la mise en réserve d'une partie des crédits générés). Cependant, le projet est de petite taille, et concentré sur un seul lieu, dans une région propice aux incendies. Le risque de non-permanence est donc élevé. En conséquence, le VCS, qui ajuste la quantité de crédits mis en réserve au profil de risque du projet, requerrait sans doute un fort pourcentage de crédits à mettre en réserve.

Le critère qui semble le plus bloquant pour ce projet est celui de la double comptabilité. L'effet de ce type de projet est théoriquement recensé dans l'inventaire forestier national et donc reporté dans l'inventaire national d'émissions de gaz à effet de serre au titre de l'article 3.3. Les conséquences en termes de perspectives de labellisation dépendent des standards des différents labels, qui ne traitent pas tous le double compte de la même manière. Le VCS exige la production d'un document officiel de la France qui atteste du retrait des Unités d'Absorption (UA) du registre national correspondant aux unités candidates à la certification (cf. encadré 1). Le CCBS attend une démonstration convaincante par projet que le problème du double compte est évité, mais pas nécessairement un document officiel. Le standard Carbon Fix propose de résoudre lui-même le problème du double compte en négociant cas par cas avec les autorités en charge l'exclusion des unités issues du projet de l'inventaire national.

Encadré 1 - Conditions posées par le VCS pour la certification des projets dans les pays de l'annexe I

Les porteurs de projets de réductions des émissions de GES à partir d'activités incluses dans un système d'échange de quotas ou qui ont lieu dans une juridiction ou secteur dont les émissions des GES sont limitées doivent prouver que les émissions ou absorptions générées par le projet n'étaient pas ou ne seront pas utilisées ni dans le système d'échange de quotas ni à des fins de conformité dans le cadre de la juridiction ou secteur dont les émissions sont limitées.

A cet effet, la preuve doit inclure soit :

- une lettre de l'opérateur du programme ou des pouvoirs publics qui garantit que les UAs (ou autres crédits utilisés dans le programme) équivalentes aux réductions ou absorptions générées par le projet ont été retirées du programme ou de l'inventaire national (selon le cas)
- l'achat et l'annulation, dans le cadre du programme en question, d'une quantité de quotas de GES équivalente aux réductions ou absorptions générées par le projet

Source : Extrait de la Section 5.2.2 du VCS 2007.1.

Projets de reconversion d'une friche agricole en surface boisée à vocation énergétique

Pour un tel projet industriel il convient d'évaluer si l'obtention de crédits carbone au titre du stock en forêt a une véritable incidence financière sur le modèle économique du projet, ou s'ils ne représentent qu'un « bonus » qui n'est pas déterminant dans le choix d'investissement, ce qui pourrait rendre délicate la démonstration de l'additionnalité économique du projet. Si le risque de non-permanence est faible, étant donnée la courte durée de révolution, la certification de ce projet se heurterait aux mêmes problèmes que le précédent vis-à-vis du double-compte.

Par ailleurs, l'effet de substitution « énergie » de ce projet peut quant à lui être valorisé dans le cadre du SCEQE ou d'un projet domestique.

Du fait du critère de double compte, les perspectives de labellisation des projets de boisement sont maigres. Toutefois un projet d'arrêté est en cours d'élaboration en France (conformément à l'article 8 de l'arrêté du 2 mars 2007) pour intégrer les projets de boisement au cadre des « projets domestiques CO₂ ».

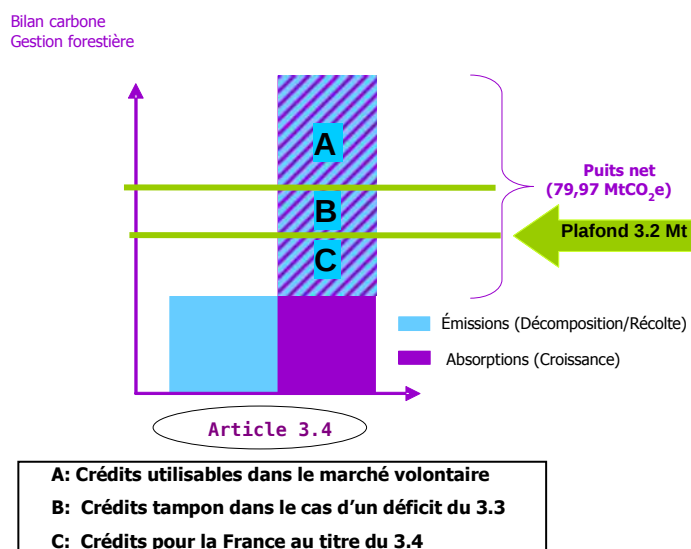
Les projets domestiques, qui sont des projets développés en France dans le cadre du mécanisme de la Mise en Œuvre Conjointe (MOC), donnent lieu à la cession par l'Etat au porteur de projet d'une quantité de quotas « Kyoto » équivalent aux émissions évitées ou séquestrées par le projet.

Les projets de nouvelle gestion sylvicole

La barrière du double compte semble plus facilement surmontable pour les projets de gestion sylvicole que pour les projets de boisement. Comme décrit dans l'encadré 1 pour des labels comme le VCS, il suffit de démontrer que le projet n'a pas d'impact sur les 3,2 millions de tonnes d'UA créditées à l'Etat français au titre de l'article 3.4.

Comme l'illustre la Figure 27, le surplus d'environ 70 millions de tonnes non créditées (A), une fois déduites les 3,2 millions de tonnes d'UA émises (C) et les 9 millions de tonnes utilisables en cas d'un déficit de l'article 3.3 (B), représente le montant allouable à des projets « volontaires » de gestion sylvicole, sans risque de double compte. Cette architecture est envisageable en suivant les règles de comptabilité actuelles dans le cadre du protocole de Kyoto, mais reste à développer et à être validée en tant que méthodologie VCS.

Figure 27 – Architecture de comptabilisation des crédits au titre de l'article 3.4



Source : CDC Climat Recherche.

Sur le long terme, l'opportunité pour les projets de gestion forestière de participer aux marchés volontaires dépendra en partie de l'issue des négociations post-2012. A la conférence de Copenhague, la question de l'UTCF dans les pays de l'annexe I et les articles 3.3 et 3.4 du protocole de Kyoto ont été discutés. Cependant, dans l'ébauche de décision publiée par le Groupe de travail sur les engagements futurs des pays développés sur le protocole de Kyoto (AWG-KP), plusieurs options restent ouvertes à propos de la comptabilité des puits de carbone.

Dans le cas d'un déplafonnement de l'article 3.4, la certification des projets de gestion sylvicole sur les marchés volontaires deviendrait délicate, du fait du double-compte. Le canal des projets domestiques serait alors à privilégier pour la valorisation du carbone de tels projets.

La certification de l'aspect « séquestration dans les produits-bois » de ces projets ne devrait pas rencontrer d'obstacle majeur, mais les quantités de carbone en jeu sont bien moindres.

Aucun des labels sélectionnés n'a déjà certifié de projets de gestion forestière améliorée. La certification d'un projet de conversion de taillis en futaie ou de changement d'essences nécessiterait donc le développement et la validation d'une méthodologie auprès du standard. Cette tâche pourrait être rendue plus facile par l'évaluation en cours par le VCS de plusieurs méthodologies de gestion forestière améliorée.

Par ailleurs, l'additionnalité du projet de surdensification risque d'être difficile à prouver quand 100 000 hectares sont d'ores et déjà gérés de cette manière en Aquitaine.

Les projets « produits du bois »

Les labels VCS et CCX permettent de créditer la séquestration dans les produits bois. La méthodologie retenue par CCX compte un crédit carbone pour chaque tonne de CO₂ séquestrée dans les produits-bois ou dans les déchets enfouis 100 ans après la récolte. Cette proportion du bois initialement récolté est calculée à partir de facteurs fournis par le département de l'énergie américain, qui varient selon le type de bois et du type d'usage. Cette méthodologie ressemble fortement à celle employée par le Californian Action Registry (CAR), un label californien reconnu par le VCS.

Comme indiqué en section I.C, le label CCX exclut les projets développés dans des pays de l'annexe I comme la France. Nous avons néanmoins utilisé leur méthodologie pour calculer les hypothétiques crédits VCS générés par de tels projets. En effet, si aucune méthodologie actuellement validée par le VCS ne permet de comptabiliser le compartiment des produits-bois, le label autorise la soumission de méthodologies de ce type.

Une telle méthodologie n'a pas à démontrer l'absence de double compte puisque la séquestration dans les produits du bois n'apparaît pas dans l'inventaire national, mais cette situation pourrait changer après 2012.

Cette méthodologie devrait néanmoins inclure une démonstration de l'additionnalité. Un porteur de projet ne pourra pas réclamer des crédits comme dû en raison du carbone séquestré dans ses produits-bois mais devra apporter la preuve que son projet génère une séquestration supplémentaire par rapport à un scénario de référence ou un critère de performance donné.

B. Quel label pour quel projet ?

Le Tableau 14 présente de manière synthétique une évaluation préliminaire de l'adéquation entre les labels et le type de projet que l'on cherche à certifier.

Tableau 14 – Evaluation préliminaire de possibilités de labellisation pour chaque projet

	VCS	CFS	CCBS
Boisement BO	-	+	+
Boisement énergie	-	+	-
Conversion taillis en futaie	+	-	++
Surdensification	+	-	-
Changement d'essences	++	-	-
Changement d'usages de bois	+	-	-
Projet d'augmentation de la récolte	-	-	-

Légende :

«-» la certification impossible ; «+» certification envisageable, méthodologie à présenter aux certificateurs ; «++» aucun obstacle majeur à la certification ; «+++» certification possible, des projets similaires ont déjà été validés.

Source : CDC Climat Recherche.

Projets de boisement/reboisement

Le projet de boisement à vocation de bois d'œuvre pourrait être certifié à la fois par CFS et par CCBS, car il présenterait les bénéfices écologiques et communautaires requis par CCBS. Le risque de double-compte reste cependant un obstacle important dans les deux cas. Les critères précis du VCS sont impossibles à satisfaire sur ce point, et la démonstration demandée par le CFS et le CCBS risque d'être également difficile à produire.

En dehors du risque de double-compte, le deuxième projet de boisement de saules pourrait être labélisé par CFS si le porteur de projet s'engageait sur une durée plus longue que 30 ans. La valorisation par le CCBS semble peu pertinente, car l'aspect biodiversité est peu présent dans le projet.

Projets de gestion sylvicole

Sous réserve d'acceptation de la démonstration d'absence de double compte, VCS et CCBS pourraient labéliser les trois projets de gestion sylvicole. Remarquons néanmoins que même si cette possibilité théorique de certification existe, VCS n'a pas encore validé de projet de ce type dans les pays de l'annexe 1. La certification via CFS n'est pas possible, car ce standard ne certifie que des projets de boisement.

Plus particulièrement, pour le projet de surdensification, il ne sera pas facile de prouver le bénéfice en termes de biodiversité nécessaire à la certification CCBS. Le projet de changement d'essence pourrait s'appuyer sur des méthodologies concernant l'augmentation de la productivité des forêts en cours de validation par le VCS.

Projets « produits du bois »

Les labels CCBS et CFS ne peuvent pas certifier ces projets qui sortent du cadre des projets purement forestiers. Pour l'instant, VCS n'a pas encore validé de méthodologie pour la séquestration dans les produits bois mais il inclut d'ores et déjà la comptabilisation carbone du compartiment « produits-bois » pour les projets qui réduisent les volumes de bois récoltés. Dans ce type de projet, le solde du compartiment « produits-bois » est alors négatif et réduit partiellement le solde du compartiment « forêt ».

C. Exemple d'évaluation de la rentabilité économique d'un projet certifié par un standard volontaire

Cet exemple illustre l'impact économique de la certification carbone. Nous travaillons ici sur l'évaluation de la faisabilité économique du projet de boisement à vocation de bois d'œuvre²⁷ (cf. section III.A.1). Malgré l'impossibilité de le faire certifier par le VCS, les règles de ce label sont utilisées dans les calculs à titre d'illustration.

L'ensemble des hypothèses utilisées pour les coûts et bénéfices liés à l'exploitation forestière, ainsi que les celles liés aux couts carbone et règles de comptabilité des crédits (VCU), sont présentées en Annexe 4.

Pour la valorisation des crédits, le prix des VCU part de 4,44 €/tCO₂e (prix moyen à la livraison estimé par Hamilton et al. (2010) pour le premier semestre de l'année 2009 pour les projets de boisement), et croît de 5 % par an²⁸. Les crédits sont assumés ex-post²⁹ (c'est-à-dire, vendus après chaque vérification qui selon nos hypothèses a lieu tous les 5 ans).

A partir du flux de bénéfices nets actualisés, la valeur actuelle nette (VAN) et le taux de rentabilité interne (TRI) du projet sont calculés avec un taux d'actualisation (i)³⁰ de 4 %, typique des projets forestiers. Ces deux indicateurs financiers sont dans le rouge, du fait de la taille réduite du projet :

²⁷ L'itinéraire technique du projet est basé sur celui d'une plantation de Noyer (*Juglans regia*) telle que décrite par Reverchon (2006). Les coûts associés à la gestion forestière et à la certification du projet sont tirés de la littérature récente. Cet itinéraire technique n'est pas immédiatement généralisable aux projets de plantation en France et les données de coûts comportent une marge d'incertitude. Les conclusions sur la faisabilité de ce type de projets « carbone » doivent donc être considérées avec prudence.

²⁸ 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.

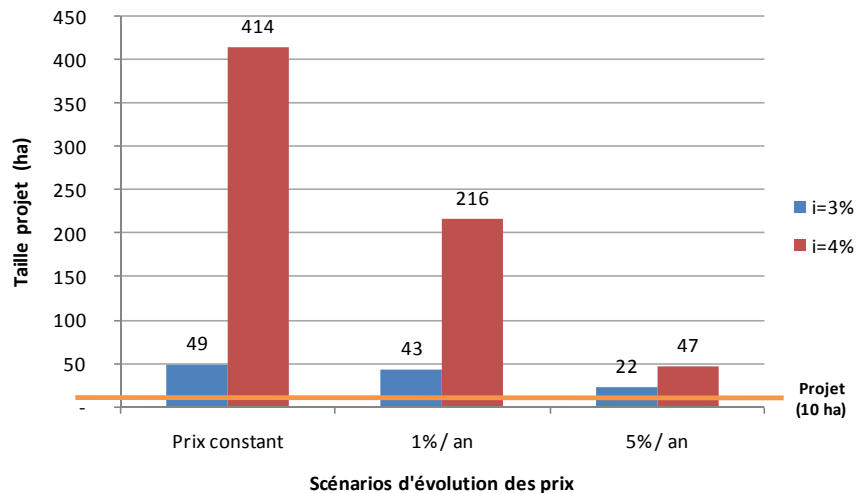
²⁹ Un scénario où les crédits sont vendus ex ante aurait certainement un impact sur la rentabilité du projet. Cette analyse n'a pas été réalisée ici.

³⁰ Le taux d'actualisation permet de déprécier des flux futurs et de déterminer leur valeur à la date d'aujourd'hui.

- La VAN est négative et égale à -31 000 € au bout de 40 ans, qui est la durée de certification carbone du projet.
- Le TRI est égal à 2 % et inférieur au coût de capital qui est pris par hypothèse à 5 %.

Puisque le projet est loin de couvrir l'ensemble des coûts, la taille « seuil de rentabilité » qui permettrait au projet d'atteindre une VAN nulle est calculée, c'est-à-dire la taille à partir de laquelle le projet devient rentable, toutes choses égales par ailleurs.

Figure 28 – Taille du projet atteignant le seuil de rentabilité selon l'évolution des prix



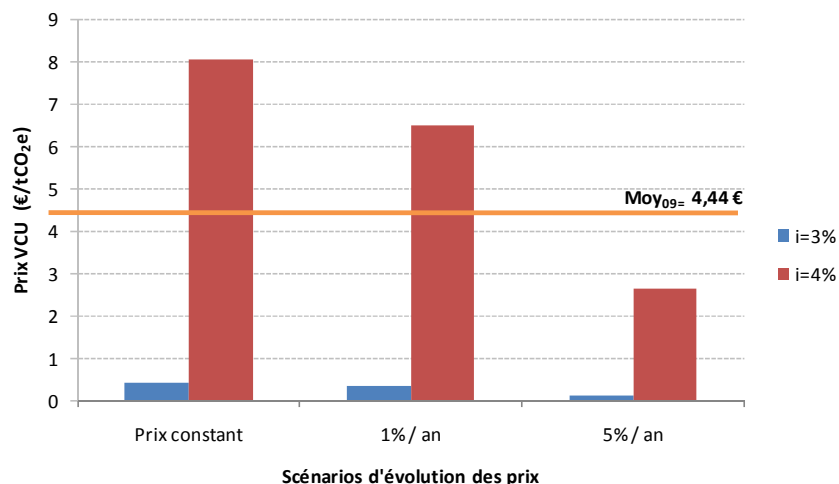
i = taux d'actualisation

Source : CDC Climat Recherche.

Cette étude de sensibilité souligne la nécessité de regrouper plusieurs projets de plantation pour atteindre le seuil de rentabilité. Pour un scénario de prix constant, il faut rassembler plus de 414 ha. Et même pour un scénario optimiste d'augmentation des prix des VCU de 5 % par an, il faut regrouper au moins 50 ha de plantation pour être rentable.

Pour un projet de majeure taille, disons 100 ha, nous réalisons la même analyse pour les prix de VCU, ce qui est illustré en Figure 29. Pour un prix croissant de 1 % par an, le prix minimal nécessaire pour que le projet commence à générer de revenus est de 6,5 €/tCO₂e.

Figure 29 – Prix assurant l'atteinte du seuil de rentabilité pour des projets de 100 ha

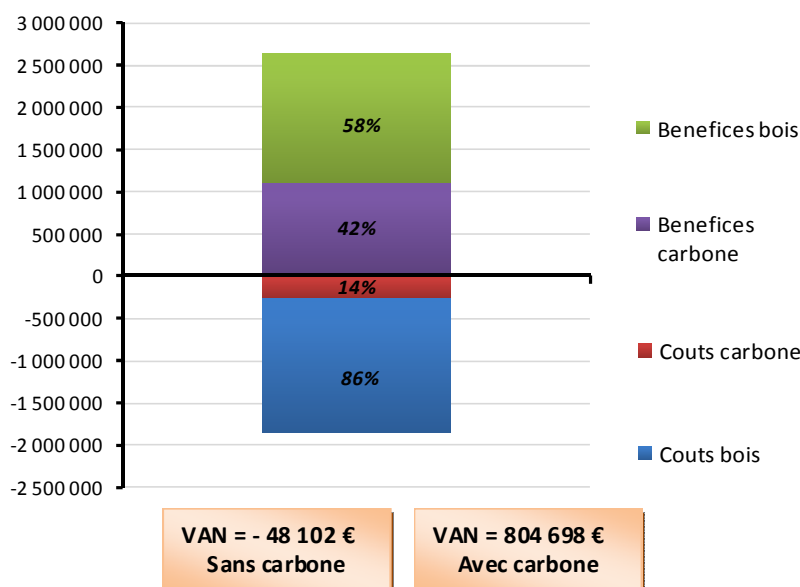


i = taux d'actualisation

Source : CDC Climat Recherche.

La Figure 30 illustre la répartition des coûts et bénéfices entre exploitation forestière et certification carbone. L'additionnalité économique du projet de boisement pour une taille de 1000 ha y transparaît clairement. La certification carbone entraîne des coûts de certification qui représentent seulement 14 % de l'ensemble des coûts du projet, tandis que la part de bénéfices carbone est de 42 %, ce qui n'est pas négligeable. En l'absence de revenus carbone, le projet n'est pas rentable avec une VAN négative de – 48 102 € ; l'introduction de la finance carbone permet d'avoir une VAN de 804 698 € et un TRI de 5 % qui compense le coût du capital.

Figure 30 – Distribution des coûts et bénéfices actualisés à 40 ans (euros) pour un projet de 1000 ha, au prix initial de 4,44 €/VCU, croissant de 5 %/an (i=4 %)



Source : CDC Climat Recherche.

IV. CONCLUSIONS

Cette Etude Climat fait un tour d'horizon de la valorisation du carbone dans la filière forêt-bois française. La synthèse des caractéristiques de la filière et du cadre réglementaire issues du protocole de Kyoto pour un pays de l'Annexe 1 comme la France permet de comprendre comment la substitution bois-énergie et bois-matériau est actuellement indirectement valorisée par les marchés réglementés, et pourquoi ceux-ci n'offrent pas encore d'opportunités pour les projets qui séquestrent du carbone en forêt ou dans les produits du bois. Sur ce second point, l'alternative consistant à valoriser le carbone sur les marchés volontaires est développée à travers 7 projets fictifs.

L'analyse des effets carbone de ces projets révèle que tous ne sont pas intéressants en termes de valorisation sur les marchés volontaires. Néanmoins, les projets de boisement à vocation de bois d'œuvre ou de gestion forestière améliorée pourraient significativement bénéficier de cette valorisation et présentent un potentiel d'atténuation de plusieurs dizaines de millions de tonnes de CO₂ à l'échelle nationale. Selon nos estimations une politique de boisement de l'ordre de 30 000 ha/an pourrait permettre la séquestration d'environ 35 MtCO₂ dans un horizon de 25 ans. La conversion massive de taillis en futaies offre le même ordre de grandeur de bénéfices « carbone ».

Enfin, à partir d'une présentation des alternatives de labellisation pour les différents projets et de la réalisation d'une évaluation économique d'un exemple de projet, les obstacles à surmonter pour réaliser ce potentiel sont illustrés. Parmi ceux-ci, l'élaboration d'une méthodologie convaincante pour traiter le risque de double-compte entre marchés réglementés et marchés volontaires est primordiale. Un autre aspect fondamental est le rassemblement d'un nombre d'hectares raisonnable pour que les projets réussissent à générer des bénéfices économiques. Dans le cas d'un projet de boisement de feuillu précieux, cette taille critique dépasse vraisemblablement la centaine d'hectares.

V. LEXIQUE

AFOLU	Agriculture, Forestry and Other Land Use
CCBS	Climate, Community and biodiversity Standard
CCX	Climate Carbon Exchange
CER	Certified Emission Reduction
CFS	Carbon Fix Standard
CFI	Carbon Financial Instrument
CO ₂	Dioxyde de carbone
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique
GES	Gaz à effet de serre
IFN	Inventaire Forestier National
LULUCF	Land-Use, Land-Use Change and Forestry
MAP	Ministère de l'Agriculture et de la Pêche
MDP	Mécanisme de Développement Propre / CDM (anglais) : Clean Development Mechanism
MOC	Mise en Œuvre Conjointe / JI : Joint Implementation
SCEQE	Système Communautaire d'Echange de Quotas d'Emissions
tCO ₂ e	Tonnes de CO ₂ équivalent
TMS	Tonnes de matière sèche
UA	Unités d'Absorption
UQA	Unité de quantité attribuées / AAU (anglais)
UTCF	Utilisation des terres, leurs changements et la forêt
VCS	Voluntary Carbon Standard
VCU	Voluntary Carbon Unit
VER	Verified Emission Reduction

ANNEXE 1 – METHODOLOGIE DES CALCULS REALISES : EXEMPLE DU PROJET DE BOISEMENT A VOCATION DE BOIS D'OEUVRE

Cette annexe détaille la procédure suivie pour le calcul de la séquestration carbone d'un projet de boisement à vocation de bois d'oeuvre. Les hypothèses, généralisations et approximations employées imposent d'utiliser ces résultats avec précaution : ce sont les ordres de grandeur, plus que les résultats précis, qui doivent être considérés dans l'analyse.

Les coefficients de conversions utilisés dans nos calculs sont :

- 1 m³ de bois exploité = 1 tonne CO₂
- 1 tonne de matière sèche (TMS) = 0,5 tonnes de carbone
- 1 tonne de carbone = 3,667 tonnes CO₂

Sauf indication contraire, tous les calculs et hypothèses ont été réalisés par la CDC Climat Recherche.

Pour les autres projets, le lecteur peut télécharger l'annexe méthodologique disponible sur le site : www.cdcclimat.com.

A. Informations générales sur le projet

Essence : Noyer hybride (*sp. juglans nigra*)³¹

Localisation : Région Provence-Alpes-Cote-d'Azur (PACA)

Taille : 10 ha

Densité initiale de plantation : 200 tiges/ha – *basse densité*

Itinéraire sylvicole : Eclaircies les années 25, 40 et 55. Coupe rase l'année 80.

B. Méthodologie utilisée pour le calcul de la séquestration carbone du projet de boisement

Stock Forêt

Les données de séquestration carbone du projet pendant la période de certification sont extraites de la comptabilité réalisée par Reverchon (2006) pour ce projet. Ces données reposent sur des modèles de croissance (Becquey, 1997) et sur les méthodologies validées par l'UNFCCC pour les projets de boisement. Les paramètres utilisés par Reverchon incluent entre autres l'infradensité du bois ($D = 0,55^{32}$) et le taux de carbone dans la matière ligneuse sèche ($T_c = 0,5^{33}$).

La séquestration carbone du projet dans son compartiment forêt est présentée en Figure 31.

Destination de la récolte : A partir des données de Reverchon des niveaux de récolte lors de chaque opération sylvicole nous faisons quelques hypothèses d'usage. La conversion de m³/ha à TMS/ha est réalisée en utilisant la densité³⁴ de l'essence à 15 % d'humidité = 0,670 TMS/m³. Ces ordres de grandeur nous permettent de voir les autres effets de prolongation de la séquestration dans les produits bois et la réduction des émissions des autres filières grâce à l'utilisation du bois dans la production énergétique ou dans la construction (Tableau 15).

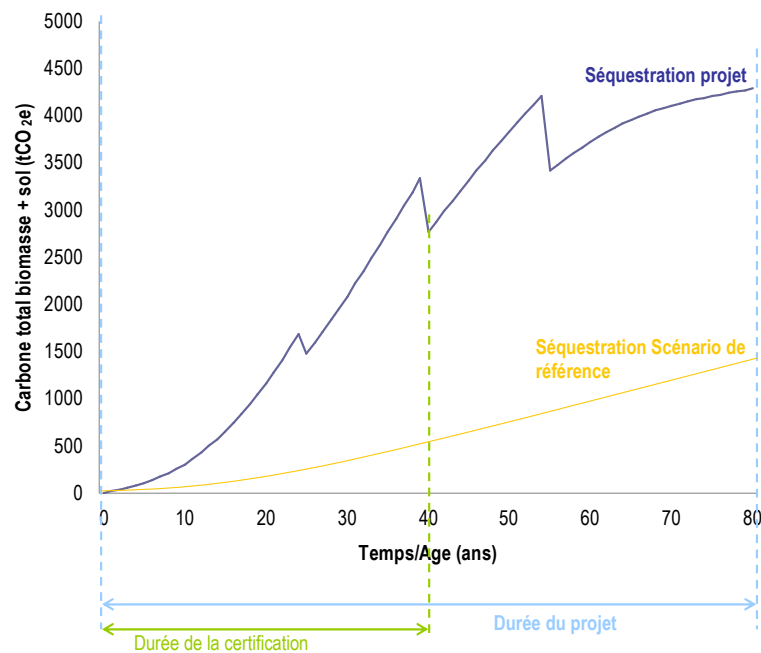
³¹ Autres essences éligibles : merisier, noyer, aulne, érable sycomore, cornier, érable champêtre, mûrier blanc, tilleul, poirier. Ces essences ont été choisies en raison de leur adaptabilité au terrain et au climat de la région.

³² Dupouey et al. (1999).

³³ GIEC.

³⁴ <http://www.worldagroforestry.org/sea/Products/AFDbases/WD/asps/DisplayDetail.asp?SpecID=1877>

Figure 31 – Séquestration de carbone par le projet de plantation futaie régulière
Exemple : 10 ha de noyer (*Juglans sp.*)



Source : CDC Climat Recherche d'après Reverchon (2006).

Tableau 15 – La récolte et son usage

Opération sylvicole	Age (années)	Récolte (m ³ /ha)	Conversion TMS/ha (15 % hum.)	Usages (%)			Volets à valoriser
				BE	BO	BI	
Eclaircie 1	25	27,7	18,5	100 %	0 %	0 %	SE
Eclaircie 2	40	57,4	38,5	90 %	10 %	0 %	SPB, SE, SM
Eclaircie 3	55	71,5	47,9	80 %	20 %	0 %	SPB, SE, SM
Coupe Rase	80	272,9	182,8	50 %	50 %	0 %	SPB, SE, SM

BE : Bois énergie, BO : Bois d'œuvre, BI : Bois d'industrie

SE : Substitution Energétique, SPB : Stock Produits Bois, SM : Substitution Matériaux

Stock Produits bois (SPB)

Nous utilisons la méthodologie CCX de calcul de la prolongation du stockage de carbone dans des 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 : à chaque type de bois son facteur de conversion carbone, selon le produit auquel il est destiné (bois d'œuvre, bois d'industrie). Les coefficients CCX présentés au niveau régional nous permettent de calculer la valeur moyenne de prolongation du stockage de carbone dans les produits bois selon les deux catégories d'usage utilisées par la suite : bois d'œuvre (*sawlog*) et bois d'industrie (*pulpwood*)

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

Source : CCX Offset Project Protocol - Forestry Carbon Sequestration³⁵.

³⁵ http://www.chicagoclimatex.com/docs/offsets/CCX_Forestry_Sequestration_Protocol_Final.pdf (page 54).

Les hypothèses d'usage de la récolte du Tableau 15 conduisent aux résultats du Tableau 16 pour le stock dans les produits-bois.

Tableau 16 – Séquestration dans les produits-bois

Opération sylvicole	Age (années)	Récolte (TMS/ha)	Récolte destinée aux produits bois (TMS)	Stock dans les produits bois (tC) (à 100 ans)		Stock dans les produits bois (tCO ₂ e) (à 100 ans)
				BO	BI	
Eclaircie 1	25	18,5	0,0	0,00	0,00	0
Eclaircie 2	40	38,5	38,5	5,30	0,00	19
Eclaircie 3	55	47,9	95,8	13,20	0,00	48
Coupe Rase	80	182,8	914,0	125,90	0,00	462

BE : Bois énergie, BO : Bois d'œuvre, BI : Bois d'industrie

Substitution énergétique (SE)

Les calculs utilisent la valeur moyenne par défaut de contenu énergétique suivante : une TMS de bois produit 2,93 kWh soit 10,56 GJ (Sources: CITEPA, 2007. OMINEA). On applique ensuite la moyenne des facteurs d'émission de CO₂ par GJ d'énergie générée du charbon, du fioul domestique et du gaz nature utilisés par le CITEPA (en accord avec les recommandations du GIEC), soit 0,8 tCO₂ évitées par TMS de bois utilisée.

Tableau 17 – Substitution énergétique

Opération sylvicole	Age (années)	Récolte (TMS/ha)	Récolte total destinée à l'énergie (TMS)	Substitution énergétique	
				énergie produite (KWh)	émissions évitées (tCO ₂)
Eclaircie 1	25	18,5	185,0	542,1	148
Eclaircie 2	40	38,5	346,5	1015,2	277
Eclaircie 3	55	47,9	383,2	1122,8	307
Coupe Rase	80	182,8	914,0	2678,0	731

Substitution matériaux (SM)

Ce calcul repose sur l'hypothèse que tout le volume de bois d'œuvre récolté dans le projet est transformé en poutres, et que ces poutres en bois substituent des poutres en aluminium. Le coefficient de substitution utilisé est celui de l'ENSTIB pour une poutre de portée = 7,5 m, charge permanente de 75 kg/m et charge d'exploitation de 300 kg/m, et volume par poutre de 0,35 m³, c'est-à-dire 321 tonnes d'émission CO₂ évitée par poutre. A partir du nombre de poutres produites par TMS de bois, on obtient l'effet de substitution matériau :

Tableau 18 – Substitution matériaux

Opération sylvicole	Age	BO (m3)	Substitution matériaux	
			Poutres	émissions évitées (tCO ₂) hyp. Aluminium
Eclaircie 1	25	0,00	0,00	0
Eclaircie 2	40	38,46	109,90	35
Eclaircie 3	55	95,78	273,67	88
Coupe Rase	80	914,08	2611,66	838

BO : Bois d'œuvre

C. Bilan de séquestration carbone – projet de 10 ha de plantation de noyer

	Stock Forêt	Produits Bois	Total Stock	Substitution	Total
Scénario de référence (à 25 ans)	0,05 ktCO ₂	0	0,05 ktCO ₂	0	0,05 ktCO ₂
Scénario de référence (à 80 ans)	0,3 ktCO ₂	0	0,3 ktCO ₂	0	0,3 ktCO ₂
Projet (à 25 ans)	1,18 ktCO ₂	0	1,18 ktCO ₂	0,14 ktCO ₂ (SE)	1,33 ktCO ₂
Projet (à 79 ans)	3,77 ktCO ₂ e	0,07 ktCO ₂	3,84 ktCO ₂	0,73 ktCO ₂ (SE) + 0,12 ktCO ₂ (SM)	4,70 ktCO ₂
Projet (à 80 ans – récolte)	0 ktCO ₂	0,53 ktCO ₂	0,53 ktCO ₂	1,47 ktCO ₂ (SE) + 0,96 ktCO ₂ (SM)	2,95 ktCO ₂

ANNEXE 2 – ESTIMATION DES CREDITS CARBONE GENERES

Le calcul des crédits générés pour chaque projet est réalisé à partir des lignes directrices du Voluntary Carbon Standard (VCS). Les seuls effets considérés dans ce calcul sont la séquestration dans en forêt et la séquestration dans les produits du bois. Les effets de substitution ne peuvent espérer être valorisés dans le cadre du VCS, pour les raisons de double-compte expliqués en partie I. Comme pour la plupart des projets carbone forestiers existants, la biomasse racinaire et le carbone du sol sont négligés.

A. Lignes directrices du VCS pour le calcul des crédits carbone

Les crédits VCS sont calculés à partir de la séquestration nette de carbone du projet à l'année t (C_t) :

$$VCU_t = \left(C_t - \sum_{i=1}^{t/v-1} C_{t-i*v} \right) * Buffer_t$$

$$Buffer_t = Risque * (1 - Release)^{t/v-1}$$

Où :

$Buffer_t$ = Buffer du projet l'année t [tCO₂e]

v = Périodicité de vérification [ans]

C_t = Carbone net séquestré par le projet l'année t [tCO₂e]

$Risque$ = % des crédits à retenir selon la 1^{re} évaluation de risque

$Release$ = % des crédits libérés suite aux évaluations ultérieures

VCU_t = compte VCU du projet l'année t [tCO₂e]

Pour garantir les crédits contre le risque de non-permanence, VCS a introduit une « mise en réserve » : une fraction des crédits générés est mise en réserve dans un compte d'assurance commun à l'ensemble des projets forestiers. La taille de cette fraction est déterminée par une évaluation du risque du projet.

Nous utilisons une fraction de mise en réserve de 30 % (*risque*) pour tous les projets. Pour ne pas subir de pénalité, les projets VCS doivent être vérifiés, et leur risque réévalué, au minimum tous les 5 ans. Nous supposons donc une périodicité de vérification de 5 ans (v). Nous supposons également que le profil de risque du projet ne change pas, ce qui donne droit à une réduction (*release*) de 15 % du montant total du « buffer » à chaque vérification.

Enfin, le nombre maximal de crédits générés par un projet au titre du stock en forêt ne peut pas dépasser la moyenne temporelle de la séquestration dans ce compartiment pendant la durée de la révolution. A titre d'exemple nous détaillons ce calcul pour le premier projet de boisement.

B. Hypothèses

Taille du projet (ha)	10
Mise en réserve(%)	30 %
Réajustement (%)	15 %
Périodicité de vérification	5
Moyenne de la séquestration nette pour la durée de la rotation (tCO ₂ e)	2438,6
Taux de séquestration créditable (tCO ₂ e)/ha/an (tCO ₂ e) ³⁶	5,8

C. Estimation de crédits

Evénement de vérification	Année (t)	Mise en réserve rajusté (%)	Sn Séquestration nette forêt +Produit bois (tCO ₂) (cf Projet)	Sc Séquestration créditable (tCO ₂) (Forêt+Pbois) Min (Sn,Moyenne)	Crédits générés	Crédits cumulés (CC _t)	Crédits escomptés du buffer (VCUs)	Crédits mis en réserve exclus	Crédits mis en réserve inclus (VCUs)
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
0	0	0,0%	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	5	30,0%	100,20	100,20	100,20	100,20	70,14	100,20	70,14
2	10	25,5%	290,82	290,82	190,68	290,82	142,02	290,82	212,16
3	15	21,7%	628,32	628,32	337,49	628,32	264,34	628,32	476,50
4	20	18,4%	1126,61	1126,61	498,29	1126,61	406,49	1126,61	882,98
5	25	15,7%	1425,99	1425,99	299,39	1425,99	252,50	1425,99	1135,48
6	30	13,3%	2022,58	2022,58	596,59	2022,58	517,17	2022,58	1652,66
7	35	11,3%	2684,63	2438,64	416,06	2438,64	368,99	2438,64	2021,65
8	40	9,6%	2683,59	2438,64	0,00	2438,64	182,46	2438,64	2204,11
9	45	8,2%	3212,57	2438,64	0,00	2438,64	35,18	2438,64	2239,29
10	50	6,9%	3712,42	2438,64	0,00	2438,64	29,91	2438,64	2269,19
11	55	5,9%	3320,75	2438,64	0,00	2438,64	25,42	2438,64	2294,61
12	60	5,0%	3602,46	2438,64	0,00	2438,64	21,60	2438,64	2316,22
13	65	4,3%	3811,77	2438,64	0,00	2438,64	18,36	2438,64	2334,58
14	70	3,6%	3938,78	2438,64	0,00	2438,64	15,61	2438,64	2350,19
15	75	3,1%	4005,85	2438,64	0,00	2438,64	13,27	2438,64	2363,46
16	80	2,6%	529,97	529,97	0,00	2438,64	11,28	2438,64	2374,73

Source : CDC Climat Recherche.

Où :

- % Mise en réserve rajusté (C) = 15 % rajusté du % à mettre en réserve à chaque vérification
- Séquestration Créditable Forêt (E) = Min (Séquestration nette, moyenne)
- Crédits générés (F) = Séquestration Créditable (E) –Crédits cumulés (H)
- Crédits mis en réserve inclus (G) = Crédits générés (K) * (1- % Mise en réserve rajusté (C))

ANNEXE 3 – CALCUL DU POTENTIEL DE SEQUESTRATION PAR BOISEMENT

Pour estimer le potentiel national de séquestration de carbone selon les deux scénarios et les quatre politiques de boisement, nous répartissons régionalement les boisements en proportion de la distribution régionale du potentiel.

Le rapport résineux/feuillus³⁶ des boisements suit le rapport régional préexistant. La capacité de séquestration de carbone par hectare dans la biomasse aérienne est tirée de Zaehle (2006) :

Tableau 19 – Capacité moyenne de séquestration de CO₂ par type d'essence pour la forêt tempérée européenne

Age (années)	Résineux (tCO ₂ e/ha)	Feuillus (tCO ₂ e/ha)
0–20	32,6	14,7
20–40	206,4	145,2
40–60	345,0	246,8
60–80	404,4	328,2
80–100	435,6	385,7
100–120	447,3	381,0
120–140	425,7	403,7

Source : Zaehle (2006) à partir des données du EEFR.

Tableau 20 – Séquestration de CO₂ accumulée des quatre politiques de boisement (MtCO₂e)

		10 ans	20 ans	50 ans
Scénario Conservateur	Pol ₁ 10 000 ha/an	1,8	4,9	62,1
	Pol ₃ 30 000 ha/an	5,5	14,6	151,8
	Pol ₅ 50 000 ha/an	9,2	19,6	175,1
	Pol ₈ 80 000 ha/an	12,9	23,7	198,3
Scénario Optimiste	Pol ₁ 10 000 ha/an	2,1	5,3	65,1
	Pol ₃ 30 000 ha/an	6,2	16,0	195,3
	Pol ₅ 50 000 ha/an	10,3	26,7	314,2
	Pol ₈ 80 000 ha/an	16,5	42,6	406,6

Source : CDC Climat Recherche.

³⁶ Rapport calculé à partir des données de l'IFN.

ANNEXE 4 – HYPOTHESES DE L'EVALUATION ECONOMIQUE

A. Essences et cycles de production et certification

Pour le projet de plantation de cette essence feuillue, le cycle retenu au niveau forestier est une révolution de 80 ans.

On suppose que le label choisi pour la certification est le standard VCS, avec une période d'accréditation de 40 ans.

	Volet Sylvicole du projet	Volet Carbone du projet
Année 0:	Implantation : préparation du site, et plantation	Documentation et Certification
Années 1 à 4:	Entretien de la parcelle	
Année 5:	Entretien de la parcelle	Vérification et délivrance de crédits
Années 10, 15, 20:		Vérification et délivrance de crédits
Année 25:	Eclaircie	Vérification et délivrance de crédits
Année 30:		Vérification et délivrance de crédits
Année 35:		Vérification et délivrance de crédits
Année 40:	Eclaircie	Vérification finale et délivrance de crédits
Année 55:	Eclaircie	
Année 80:	Récolte	

B. Séquestration carbone du projet

Les données de séquestration carbone du projet pendant la période de certification sont extraites de la comptabilité de Reverchon (2006) pour ce projet.

Ces données reposent sur des modèles de croissance (Becquey, 1997) et sur les méthodologies validées par la CCNUCC pour les projets de boisement.

C. Coûts d'investissement et d'opération³⁷

Etapes	Projet (100 ha)		Projet (1000 ha)		Source
Mise en œuvre du projet (bois et carbone)					
Préparation du site	259,15		€/ha	Guyon (1998)	
Coût de Plantation	609,76		€/ha	Guyon (1998)	
Inventaire	6 047,99	€ (100 ha)	17 279,98	€ (1000 ha)	Galik et al (2009)
Préparation Plan de Gestion	5 183,99	€ (100 ha)	25 919,97	€ (1000 ha)	Galik et al (2009)
Mise en œuvre du projet (carbone seulement)					
Développement projet carbone (PDD, planification)	3 456,00	€ (100 ha)	8 639,99	€ (1000 ha)	Galik et al (2009)
Calcul pré-projet (risque, fuites, impacts sociaux, etc)	864,00	€ (100 ha)	4 319,99	€ (1000 ha)	Galik et al (2009)
Conversion de l'inventaire au scénario de référence	1 123,20	€ (100 ha)	3 456,00	€ (1000 ha)	Galik et al (2009)
Modélisation de la séquestration pour les premières années	302,40	€ (100 ha)	518,40	€ (1000 ha)	Galik et al (2009)
Comptabilité Produits Bois	518,40	€ (100 ha)	864,00	€ (1000 ha)	Galik et al (2009)
Coûts d'opération du projet (bois et carbone)					
Coûts d'entretien (5 ans)	152,44		€/ha	Guyon (1998)	
Coûts d'exploitation forestière (éclaircies et coupe rase)	207,29		€/ha	Galik et al (2009)	
Coûts d'opération du projet (Monitoring et mesure carbone seulement)					
Echantillonnage/Monitoring	46,38		€/ha - per event	Galik et al (2009)	
Rapport annuel de Vérification	13,82		€/ha - per event	Galik et al (2009)	
Registre et Délivrance					
Frais Registre (Exemple Régistre CDC)	0,05		€/VCU	CDC (2009)	
Frais délivrance (VCSA)	0,04		€/VCU	VCS (2009)	

Pour simplifier nos calculs, on utilise la moyenne des coûts de certification carbone (mise en œuvre) qui s'élève à 40 000 € pour n'importe quelle taille de projet.

³⁷ Taux de change : 1,429 US\$/€ et 6,65 FF/€.

D. Production

La production en bois de cette plantation est extraite des calculs menés par Reverchon (2006) à partir des modèles de croissance. On obtient une valeur différente pour chaque éclaircie et coupe rase. Elle est présentée dans le tableau suivant, en utilisant la masse volumique et le taux d'humidité du chêne (respectivement 0,95 tonnes de matière brute (TMB) par mètre cube et 0,61 tonnes de matière sèche (TMS) par TMB).

Opération sylvicole (diamètre)	Age	Récolte (m ³ /ha)	Conversion TMS/ha (15% hum)	Destination
Eclaircie 1 (28 cm)	25	27,68	18,5456	100% Bois énergie
Eclaircie 2 (40 cm)	40	57,41	38,4647	80% Bois énergie – 20% Bois œuvre (50% énergie)
Eclaircie 3 (48 cm)	55	71,48	47,8916	60% Bois énergie – 40% Bois œuvre (50% énergie)
Coupe Rase (50 cm)	80	272,86	182,8162	100% Bois œuvre (50% énergie)

E. Revenus tirés de la récolte

Le prix du bois de noyer dépend principalement de trois facteurs : le diamètre, l'usage et la qualité des tiges récoltées (bonne longueur, absence de noeuds, bel éveinage, etc.). Nous prenons ici un prix fixe pour le bois-énergie et un prix proportionnel au diamètre pour le bois d'œuvre.

$$P_{\text{énergie}} = 20\text{€/TMS}$$

Source : Lecocq (2008).

$$P_{\text{bois œuvre (récolte, D=50 cm)}} = 1300\text{€/m}^3$$

Source : Forum Jardinage³⁸

$$P_{\text{bois œuvre (éclaircie, D=48 cm)}} = 1248\text{€/m}^3$$

$$P_{\text{bois œuvre (éclaircie, D=40 cm)}} = 1040\text{€/m}^3$$

F. Revenus tirés de la vente des crédits

Les revenus attendus de la vente de crédits sont fonction du volume de crédits générés et de la valeur escomptée de ces crédits. Ceux-ci dépendent de trois facteurs : le potentiel de séquestration net de carbone (absorptions – émissions) du projet, la période de comptabilisation, et le prix des crédits sur le marché volontaire.

Le prix des crédits volontaires est extrêmement variable, même quand il s'agit de crédits générés par un standard unique comme les VCU (Guigon et al. 2009). Nous utilisons ici le prix moyen des crédits volontaires issus des projets de boisement à la livraison, tel qu'estimé par Hamilton et al. (2010) pour l'année le premier semestre 2010: 6,34 \$/tCO₂e (4,44 €/tCO₂e).

Les fractions de crédits mis en réserve et de « release » sont indiquées en Annexe 2.

³⁸ <http://forums.futura-sciences.com/jardinage/301232-prix-dun-noyer.html>

VI. REFERENCES

- Arrouays, D., J. Balesdent, J.C. Germon, P.A. Jayet, J.F. Soussana et P. Stengel (eds). (2002). Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective. Synthèse du rapport. INRA (France), 32 pp.
- Bilek, E. M., Becker, P., McAbee, T. 2009. CVal: A Spreadsheet Tool to Evaluate the Direct Benefits and Costs of Carbon Sequestration Contracts for Managed Forests. FPL–GTR–180. U.S. Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI. 30 p.
- CarbonFix, 2008, CarbonFix Standard - Version 2.0 Criteria. CarbonFix, Staufen – Germany
- Chenost C., Septembre 2007, Vers une gestion intégrée des forêts et des produits bois pour la lutte contre le changement climatique, Thèse Professionnelle, Institut Supérieur International de Gestion de l'Environnement
- Chicago Climate Exchange, 2006, Rulebook : CCX Exchange Offsets and Exchange Early Action Credits
- Climate, Community, and Biodiversity Standard, 2008, 2nd Edition
- Pearce D., Turner K., 1990, Economics of Natural Resources and the Environment, The John Hopkins University Press.
- De Cara S., Thomas, A., Projections d'émissions/absorptions de gaz à effet de serre dans les secteurs forêt et agriculture aux horizons 2010 et 2020, Rapport final pour le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. Thiverval-Grignon : UMR Economie publique, 2008. 202 p.
- FCBA, juillet 2008, Comptabilisation du carbone dans les produits bois en France, en vue d'un rapportage volontaire dans l'inventaire national 2006 des émissions et absorptions de gaz à effet de serre, réalisé au titre du Protocole de Kyoto
- Galik C., Baker J., Grinnell, J., Transaction costs and forest management carbon offset potential, Duke University, 2008, 15 p.
- Galik, C., Mobley, M., Richter, D., forthcoming. A virtual "field test" of forest management carbon offset protocols: the influence of accounting. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2008
- Galik, C. S., Richter, D. de B., Mobley, M. L., Olander, L. P., Murray, B. C. 2008. A Critical Comparison and Virtual "Field Test" of Forest Management Carbon Offset Protocols. Climate Change Policy Partnership, Durham, NC. 45 p.
- Gardette Y-M., Locatelli B., Mai 2007, Les marchés du carbone forestier, ONF International, Cirad
- GIEC, 2006, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>, IPCC AFOLU Guidelines
- Guigon P., Bellassen V., Ambrosi P., Voluntary Carbon Markets: What the Standards Say..., CDC Climat Recherche
- Goodale, C. L., Apps, M. L., Birdsey, R. A., Field, C. B., Heath, L. S., Houghton, R. A., Jenkins, J. C., Kohlmaier, G. H., Kurz, W., Liu, S., Nabuurs, G., Nilson, S., and Shvidenko, A. Z. (2002). Forest carbon sinks in the Northern hemisphere. Ecological Applications 12, 891-899.
- Guyon, J.P. (1998), Références Forêt 2^e Edition, Editions Synthèse Agricole, 296 p.
- Hamilton K., Sjardin M., Marcello T., Shapiro A. (2009), Fortifying the Foundation: State of the Voluntary Carbon Markets 2009, Ecosystem Marketplace & New Carbon Finance
- Hamilton K., Chokkalingam U., Bendana M., (2010), State of the Forest Carbon Markets 2009: Taking Root & Branching Out, Ecosystem Marketplace
- Janssens, I. A., Freibauer, A., Ciais, P., Smith, P., Nabuurs, G., Folberth, G., Schlamadinger, B., Hutjes, R. W. A., Ceulemans, R., Schulze, E. D., Valentini, R., and Dolman, A. J. (2003). Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO₂ emissions. Science 300, 1538-1542.

- Kägi, Schmidtke. A qui va l'argent ? Qu'est-ce que les propriétaires de forêts des pays développés attendent du protocole de Kyoto, Document préparé pour la FAO.
- Leguet B., Merckx V. (2005), « Puits de Carbone » domestique : quel intérêt pour la France ?, CDC Climat Recherche (CDC), ONF
- Leseur A. (2007), Promotion de la séquestration biologique du carbone par l'agriculture et la forêt en France, Caisse des Dépôts / CDC Climat Recherche et Société des Agriculteurs de France
- Luyssaert et al. (2007), The CO₂-balance of boreal, temperate and tropical forests derived from a global database, *Global Change Biology*, 13(12), 2509-2537.
- Malfait J. J., Pajot G., Séquestration des flux de carbone forestier: Mise en place d'un projet d'additionnalité des usages du bois dans la construction, Université de Bordeaux GREThA UMR CNRS 5113 & Macaulay Institute, Aberdeen, UK Cahiers du GREThA n°2008-16
- Malfait J. J., Pajot G., Séquestration des flux de carbone forestier : rotations des peuplements, prise en compte des produits bois et optimisation des stocks de carbone, Université de Bordeaux GREThA UMR CNRS 5113 & Macaulay Institute, Aberdeen, UK Cahiers du GREThA n°2008-19
- Maris C., 2008, L'accès aux marchés du carbone pour les propriétaires forestiers français : Sortir de Kyoto ?, CRPF d'Aquitaine, Mémoire de fin d'étude pour l'ENITA Bordeaux
- Martin A., Nollen G., (2009), Financial and economic analysis of forestry carbon trading
- MEEDDAT (2008), Réaliser un projet MDP ou MOC de réduction des émissions de gaz à effet de serre : Quelles opportunités, comment passer à l'action.
- Merger E., Williams A., (2008), Comparison of Carbon Offset Standards for Climate Forestation Projects participating in the Voluntary Carbon Market, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand
- Merger E., (2008), Forestry Carbon Standards 2008
- New Carbon Finance, 15 September 2008, Voluntary Carbon Index
- Office National des Forêts, printemps 2008, Forêt, bois énergie, bois matériau et carbone, RDV techniques n°20
- Pearson, T., Brown, S., Andrasko, K. 2008. Comparison of registry methodologies for reporting carbon benefits for afforestation projects in the United States. *Environmental Science and Policy* 11(6): 490 p. 504.
- Puech J. (2009), Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois, Paris : Ministère de l'Agriculture
- UNFCCC, 1997, Protocole de Kyoto
- Reverchon, F., 2006 Fixation de carbone par des plantations forestières provençales et application à la lutte contre l'effet de serre en région PACA, Mémoire de fin d'études, FIF, ENGREF.
- Taverna, R., Hofer, P., Werner, F., Kaufmann, E., Thürig, E., (2007): The CO₂ effects of the Swiss forestry and timber industry. Scenarios of future potential for climate-change mitigation. *Environmental studies* no. 0739. Federal Office for the Environment, Bern, 102 pp.
- Trumper, K., Bertzky, M., Dickson, B., van der Heijden, G., Jenkins, M., Manning, P. (2009), The Natural Fix? The role of ecosystems in climate mitigation. A UNEP rapid response assessment, United Nations Environment Programme, UNEP-WCMC, Cambridge, UK
- U.S. Department of Energy, 2006, Forestry Appendix
- Voluntary Carbon Standard, 2009, Guidance for Agriculture Forestry and Other Land Use Projects
- Werner F., Taverna R., Hofer P., Richter K., October 2005, Carbon pool and substitution effects of an increased use of wood in buildings in Switzerland : first estimates, Environment and Development, Zurich
- WWF, Kollmuss A., Zink H., Polycarp C., March 2008, Making Sense of the Voluntary Carbon Market : A Comparison of Carbon Offset Standards, Stockholm Environment Institute



VII. LA SERIE 'ETUDES CLIMAT' DE CDC CLIMAT RECHERCHE

- N°19 **La politique climatique en Australie : vers un système d'échange de quotas**
OLIVER SARTOR – Février 2010
- N°18 **Infrastructures de transport en France : vulnérabilité au changement climatique et possibilités d'adaptation**
IAN THOMAS COCHRAN – Septembre 2009
- N°17 **Financer l'adaptation aux Changements Climatiques**
ANITA DROUET – Avril 2009
- N°16 **Développement des énergies renouvelables : quelle contribution du marché carbone ?**
CECILE BORDIER - Décembre 2008
- N°15 **Du changement dans l'air : les bases du futur marché américain du carbone**
CATE HIGHT & GUSTAVO SILVA-CHAVEZ - Octobre 2008
- N°14 **Réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts : quelle contribution de la part des marchés carbone ?**
VALENTIN BELLASSEN, RENAUD CRASSOUS, LAURA DIETZCH & STEPHAN SCHWARTZMAN – Septembre 2008
- N°13 **Echanges de quotas en période d'essai du marché européen du CO₂ : ce que révèle le CITL**
RAPHAËL TROTIGNON & ANAÏS DELBOSC - Juin 2008
- N°12 **Fonds d'investissement CO₂ : l'essor des capitaux privés**
IAN THOMAS COCHRAN & BENOIT LEGUET - Octobre 2007
- N°11 **Compenser pour mieux réduire – Le marché de la compensation volontaire**
VALENTIN BELLASSEN & BENOIT LEGUET - Septembre 2007
- N°10 **Croître sans réchauffer ? L'intensité carbone des économies développées**
ANAÏS DELBOSC, JAN HORST KEPPLER & ALEXIA LESEUR - Janvier 2007
- N°9 **Trading in the Rain ; Précipitations et émissions du secteur électrique européen**
KATIA HOUPERT & ARIANE DE DOMINICIS - Juillet 2006
- N°8 **Panorama des Plans nationaux d'allocation des quotas en Europe**
CLAIRE DUFOUR & ALEXIA LESEUR - Avril 2006
- N°7 **Fonds d'investissement dans les actifs CO₂ : l'accélération**
ARIANE DE DOMINICIS - Novembre 2005
- N°6 **Agriculture et réduction des émissions de gaz à effet de serre**
BENOIT LEGUET - Septembre 2005
- N°5 **Les expériences de projets domestiques CO₂ dans le monde**
ARIANE DE DOMINICIS - Septembre 2005
- N°4 **Les enjeux de la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le bâtiment**
EMMANUEL ARNAUD - Septembre 2005
- N°3 **Les plateformes de marché et le fonctionnement du système de quotas CO₂**
ROMAIN FREMONT - Juin 2005
- N°2 **Plan National d'Allocation des Quotas et territoires**
EMMANUEL ARNAUD - Mars 2005
- N°1 **Les fonds d'investissement dans les actifs carbone : état des lieux**
ARIANE DE DOMINICIS - Janvier 2005

Toutes les publications de CDC Climat Recherche sont disponibles sur :

<http://www.caissedesdepots.fr>

Directeur de la Publication :

BENOIT LEGUET
benoit.leguet@caissedesdepots.fr

+33 1 58 50 98 18

Contacts CDC Climat Recherche:

EMILIE ALBEROLA **+33 1 58 50 41 76**
emilie.alberola@cdcclimat.com

MAY ARMSTRONG **+33 1 58 50 76 27**
may.armstrong@cdcclimat.com

VALENTIN BELLASSEN **+33 1 58 50 19 75**
valentin.bellassen@cdcclimat.com

MALIKA BOUMAZA **+33 1 58 50 37 38**
malika.boumaza@cdcclimat.com

PHILIPPE CHARRIER **+33 1 58 50 98 39**
philippe.charrier@cdcclimat.com

IAN COCHRAN **+33 1 58 50 85 17**
ian.cochran@cdcclimat.com

MARIANA DEHEZA **+33 1 58 50 99 85**
mariana.deheza@cdcclimat.com

ANAÏS DELBOSC **+33 1 58 50 99 28**
anais.delbosc@cdcclimat.com

GASPARD DUMOLLARD **+33 1 58 50 74 89**
gaspard.dumollard@cdcclimat.com

JÉRÉMY ELBEZE **+33 1 58 50 98 19**
jeremy.elbeze@cdcclimat.com

CÉCILE GOUBET **+33 1 58 50 76 56**
cecile.goubet@cdcclimat.com

MORGAN HERVÉ-MIGNUCCI **+33 1 58 50 99 77**
morgan.herve-mignucci@cdcclimat.com

HALIL KARATAS **+33 1 58 50 83 39**
halil.karatas@cdcclimat.com

JESSICA LECOLAS **+33 1 58 50 98 20**
jessica.lecolas@cdcclimat.com

ALEXIA LESEUR **+33 1 58 50 41 30**
alexia.leseur@cdcclimat.com

CHRISTOPHE MEILHAC **+33 1 58 50 84 44**
christophe.meilhac@cdcclimat.com

OLIVER SARTOR **+33 1 58 50 85 20**
oliver.sartor@cdcclimat.com

DOROTHÉE TEICHMANN **+33 1 58 50 84 45**
dorothee.teichmann@cdcclimat.com

*Cette Etude Climat a été réalisée
par la Direction Recherche de
CDC Climat, filiale de la Caisse
des Dépôts dédiée à la lutte
contre le changement climatique.*

*CDC Climat Recherche produit
des analyses et des recherches
publiques sur l'économie du
changement climatique.*

*Les auteurs assument l'entière
responsabilité de toute erreur ou
omission.*