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

CNPF
CENTRE RÉGIONAL
PROVENCE
ALPES CÔTE D'AZUR

Construction des bases technico-économiques d'un projet carbone de gestion forestière améliorée

Conversion de taillis de hêtre méditerranéens en futaie

Mémoire de dominante Gestion Forestière

Jonathan Pitaud

Année 2013-2014

Crédits photographiques : Jonathan Pitaud

sauf illustration n° 2 : Marie de Guisa

AgroParisTech
Institut des sciences et industries du vivant
et de l'environnement

Centre régional de la propriété forestière
Provence-Alpes-Côte d'Azur

Construction des bases technico-économiques d'un projet carbone de gestion forestière améliorée

Conversion de taillis de hêtre méditerranéens en futaie

Mémoire de dominante Gestion Forestière

Jonathan Pitaud

Année 2013-2014

Résumé

L'étude vise à évaluer le service de séquestration de carbone fourni dans le cadre d'un projet dit de gestion forestière améliorée de conversion de taillis de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) en futaie. Les peuplements en question font partie d'un regroupement de propriétaires (association syndicale libre « le Tréboux ») des Alpes-de-Haute-Provence situés sur le versant sud de la montagne de Lure. En parallèle, une réflexion sur la valorisation économique de ce service est menée en ciblant les marchés volontaires du carbone. Après avoir caractérisé le contexte des marchés du carbone, le projet est évalué au regard des critères de qualité exigés par ces derniers dont l'additionnalité et la permanence.

Afin de faire face au manque de connaissances de ces peuplements, il a été choisi d'installer un réseau de 43 placettes permanentes. Outre son rôle de suivi dans le temps et donc d'accréditation de la démarche, les données dendrométriques qui en sont issues ont permis de calibrer empiriquement des modèles de croissance. Nous sommes donc en mesure de proposer une scénarisation à long terme basée sur les observations de terrain.

La scénarisation permet, dans le respect des méthodologies développées par l'Institut pour le développement forestier et la Forêt privée française, de quantifier le bénéfice additionnel lié principalement à la séquestration de carbone en forêt. La conversion du taillis en futaie conduirait à la conservation, à long terme, d'une quantité de biomasse supérieure représentant environ 60 tCO_2/ha. Par ailleurs, la scénarisation des récoltes met en évidence un manque à gagner important pour le propriétaire. Convertir le taillis plutôt que de conserver ce mode de gestion produit un report des recettes et des surcoûts de gestion non compensés par un prix du bois éventuellement plus élevé. Cette moins-value est estimée à 1 100 €/ha pour la meilleure fertilité. Celle-ci pourra servir de base au paiement de ce service écosystémique pour lequel nous proposons deux montages.

Abstract

This study intends to evaluate the carbon sequestration service produced by an improved forest management project converting coppice to high forest of beech (*Fagus sylvatica* L.). These stands belong to an owners association (association syndicale libre « le Tréboux ») situated in Alpes-de-Haute-Provence, in the southern side of Lure mountain (South-East France). Simultaneously, we thought about the economic valuation of this service focusing on voluntary carbon markets. After determining the carbon markets characteristics, we will analyse to what extent the project fits their demands relative to additionality and permanency.

In order to fill the lack of knowledge about these stands, we decided to settle a 43 permanent sample plots net. In addition to its mission of monitoring, which brings more credibility to the project, trees measurements data allowed us to develop empirical growth models. There for, we were able to plan stands growth on a long term basis fitting field observations.

The schedule allows us, according to methodologies developed by the Institute for forest development and the French private forest organisation, to quantify the additional benefit of sequestration mostly in the forest stock. Converting coppice to high forest should keep, on a long term basis, a higher level of biomass in forest of approximately 60 tCO_2/ha. Moreover, the harvests schedule shows that it leads to a substantial financial loss for the owners. Converting coppice, instead of keeping on this practice, postpones revenues and increases management costs which is not compensated by a likely increase of the wood price. This loss should be about 1 100 €/ha for the most fertile lands. This could be used to set the payment for this ecosystem service in two suggested project developments.

Remerciements

Je souhaite ici remercier les personnes qui ont participé ou m'ont assisté dans mon travail de façon plus ou moins directe.

En premier lieu, je remercie mon maître de stage, Gilles Martinez (chargé de mission politiques territoriales au CRPF) à l'origine du sujet. En sa présence j'aurai profité de sa capacité d'innovation extraordinaire. C'est son intérêt pour l'ajout permanent de nouvelles cordes aux arcs des forestiers méditerranéens qui nous a porté à travailler sur la thématique du carbone qui est une préoccupation récente. Grâce à lui j'ai aussi découvert le métier d'animateur dans un territoire qui m'est devenu cher.

Je dois un grand merci à Marie de Guisa, camarade de promotion et amie, qui m'a donné un coup de main mémorable lors de l'installation du réseau de placettes permanentes. Bien sûr le coup de main a donné lieu à un retour de ma part pour le plaisir d'échanges très enrichissants à propos des chantiers d'exploitation. Aspect incontournable de l'intégration d'un maximum d'enjeux en Provence à côté duquel je serai sûrement passé sans elle – et Gilles que nous partagions. Précieuse collaboration donc.

J'en reviens à l'encadrement de qualité dont j'ai profité. Merci à Pauline Marty (ingénieur environnement du CRPF) pour son suivi et ses conseils tant techniques que pédagogiques. Au CRPF PACA, je remercie aussi Louis-Michel Duhen, correspondant carbone, pour nos quelques discussions d'un grand intérêt. Je n'oublie pas non plus les personnels qui ont fait en sorte que mon stage se déroule dans de bonnes conditions, y compris matérielles : Philippe Thévenet, Directeur, Camille Hardillier qui aura été d'une précieuse aide pour de nombreux « dépatouillages », Bernard Petit pour la logistique matérielle et informatique et les autres.

Eric Lacombe, mon enseignant tuteur, aura gardé un œil attentionné tout en me permettant de travailler de façon plutôt autonome. Je le remercie pour son dévouement et sa disponibilité extraordinaires au regard de ses engagements pédagogiques

Je remercie Loïc Casset et Simon Martel, du groupe national carbone du CNPF, qui m'ont transmis leur expérience du carbone forestier français. En particulier, Simon aura été d'un appui essentiel tout au long du stage, de la bibliographie à la relecture avisée de ce rapport tout en m'ayant permis d'approcher de près le petit monde du carbone forestier. Une bonne part de l'avancée de mon travail lui est due.

Je souhaite aussi mettre en avant Elsa Bardi Assante du Conseil régional de PACA qui m'a offert la possibilité matérielle d'assister à la réunion du Club Carbone Forêt Bois à Paris, posant ainsi les jalons de possibles partenariats avec le CRPF.

Quelques personnels de l'Office national des forêts auront été des personnes ressources de choix : Jean Ladier qui m'a transmis des résultats expérimentaux exceptionnels pour mon travail, Pierre Vuillermoz et Vincent Brocheny (retraité) qui m'ont accordé un temps précieux pour me transmettre leur expertise de la gestion de peuplements encore mal appréhendés.

Pour finir, je remercie tout particulièrement Claude Pellissier, Maire de La Rochegiron et trésorier de l'ASL du Tréboux pour son aide logistique mais aussi – et surtout – pour m'avoir fait découvrir et donné les clés de la lecture du paysage agricole de la commune. Une belle rencontre que je n'oublierai pas.

Table des matières

Remerciements....1
Index alphabétique des sigles....3
Introduction....4
1 Éléments de contexte....4
1.1 Contexte forestier local....4
1.2 Contexte des marchés du carbone....7
1.2.1 Des marchés réglementaires vers les marchés volontaires : blocages impliqués....8
1.2.2 État des marchés volontaires du carbone....9
1.2.3 Exigences spécifiques perçues des marchés volontaires....10
1.2.4 Stratégie de la forêt privée....10
1.3 Bilan : problématique du stage....11
2 Méthode....11
2.1 Comparaison de deux scénarios sylvicoles....11
2.1.1 Choix du scénario de référence....11
2.1.2 Scénario alternatif : conversion du taillis en futaie par balivage....12
2.2 Un réseau de placettes permanentes, outil central de caractérisation et de suivi....14
2.3 Choix des paramètres nécessaires à la quantification du carbone....15
2.3.1 Compartiments considérés....15
2.3.2 Coefficients de conversion....16
2.3.3 Tarifs de cubage....17
2.3.4 Calculs économiques et hypothèses associées....19
2.4 Critère(s) de comparaison....20
2.4.1 Critères économiques....20
2.4.2 Critères « carbone »....21
3 Résultats....22
3.1 Résultats dendrométriques issus de l'inventaire....22
3.2 Modélisation de l'évolution des peuplements et bénéfice(s) carbone associé(s)....26
3.2.1 Élaboration de modèles de croissance....26
3.2.2 Utilisation des modèles et calcul des bénéfices carbone....28
3.3 Rentabilité comparée des itinéraires....32
3.4 Bilan au regard des critères de qualité exigés pour les projets carbone....34
3.4.1 Additionnalité....34
3.4.2 Permanence et risques de fuites....34
3.4.3 Co-bénéfices associés au projet....36
4 Discussion, conclusion....38
4.1 Discussion de la validité des résultats et incertitudes....38
4.2 Perspectives de contractualisation et montages possibles....39
4.2.1 Comparaison de deux propositions de montage....39

4.2.2 Propositions en vue d'un élargissement et d'une simplification de la démarche.....41
4.3 Suites à donner.....*42*
Conclusion.....**42**
Bibliographie.....**44**
Contacts.....**47**
Annexes.....**48**

Index alphabétique des sigles

BASI : bénéfice actualisé en séquence infinie

BPA : bénéfice potentiel d'atténuation

CCNUCC : Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (UNFCCC en anglais)

CITEPA : Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique

CNPF : Centre national de la propriété forestière

CRPF : Centre régional de la propriété forestière

FD : forêt domaniale

FPF : Forêt privée française

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais)

GSMAS : Guide des sylvicultures de montagne Alpes du Sud françaises

IDF : Institut pour le développement forestier

MDP : mécanisme de développement propre

MOC : mise en œuvre conjointe

ONF : Office national des forêts

PACA : Provence-Alpes-Côte d'Azur

PSG : plan simple de gestion

REDD : *Reducing emissions from deforestation and forest degradation*

SRGS : Schéma régional de gestion sylvicole

UTCF : Utilisation des terres, leurs changements et la forêt (LULUCF en anglais)

Introduction

Ce rapport constitue le fruit des travaux effectués dans le cadre de mon stage réalisé au sein de la délégation régionale de Provence-Alpes-Côte-d'Azur (PACA) du Centre national de la propriété forestière (CNPF) à savoir le centre régional de la propriété forestière PACA (nommé CRPF PACA par la suite). Le CNPF est un établissement public d'État à caractère administratif dont les missions sont définies par l'article L321-1 du Code forestier. Parmi celles-ci, on peut citer, l'agrément des plans simples de gestion (PSG), l'animation auprès des propriétaires et le développement du territoire notamment sous l'axe du regroupement des propriétaires privés et la formation de ces derniers. Pour ce qui nous concerne, le CRPF porte aussi des missions de valorisation des services produits par la forêt notamment dans l'optique de la lutte contre les changements climatiques. Les CRPF ont aussi la possibilité de réaliser des études dont certaines le sont par une réseau national de compétences au sujet du carbone forestier.

Plus particulièrement, j'y étais encadré par Gilles Martinez, chargé de mission « politiques forestières territorialisées ». Par son action d'animation, il a été à l'origine d'un regroupement de propriétaires important au milieu des années 2000.

L'étude s'inscrit dans le cadre des réflexions d'actualité concernant la valorisation des services écosystémiques. Et ce sous l'angle principal de la séquestration du dioxyde de carbone (CO_2), gaz à effet de serre impliqué dans le réchauffement climatique. L'étude dans laquelle nous nous inscrivons a pour objectif de transposer dans l'arrière pays méditerranéen les quelques précédents métropolitains de valorisation de carbone forestier. L'objectif étant de créer un exemple abouti et fonctionnel pouvant appuyer un développement plus large ensuite. Ce rapport est formé d'une partie introduisant le contexte forestier et celui lié à la valorisation économique du carbone posant ainsi les jalons de la problématique. Suit la présentation de la méthode développée et mise en œuvre afin d'y répondre. Enfin, seront exposés les résultats et nous conclurons sur les possibilités de valorisation du projet et par un avis plus personnel sur l'opportunité d'une telle démarche.

1 Éléments de contexte

1.1 Contexte forestier local

La forêt méditerranéenne concentre des enjeux forts et diversifiés. La multifonctionnalité des espaces forestiers y est exacerbée du fait d'enjeux de production très limités à la fois par le climat mais aussi par une filière de valorisation peu développée. Les forestiers doivent répondre à des questions liées à la chasse, l'environnement, l'accueil du public, le paysage, le risque incendie sous contrainte de revenus du bois faibles. Il apparaît aujourd'hui clairement que les réponses doivent se raisonner à l'échelle des massifs ce que complique le morcellement de la propriété. Le CRPF mène, par conséquent, depuis déjà plusieurs années des actions de regroupement des propriétaires en vue d'une gestion concertée intégrant un maximum d'enjeux à des échelles larges.

La zone d'étude est située dans le département des Alpes-de-Haute-Provence, principalement sur la commune de La Rochegiron sur le versant sud de la Montagne de Lure. La carte ci-dessus permet de situer le village au sud de la crête de Lure. Les découpages à l'échelle nationale correspondent aux sylvoécorégions définies par l'Inventaire forestier national. Plus précisément, elle se focalise sur le territoire de l'association syndicale libre (ASL) du Tréboux. Cette ASL regroupe depuis 2007 une cinquantaine de propriétaires

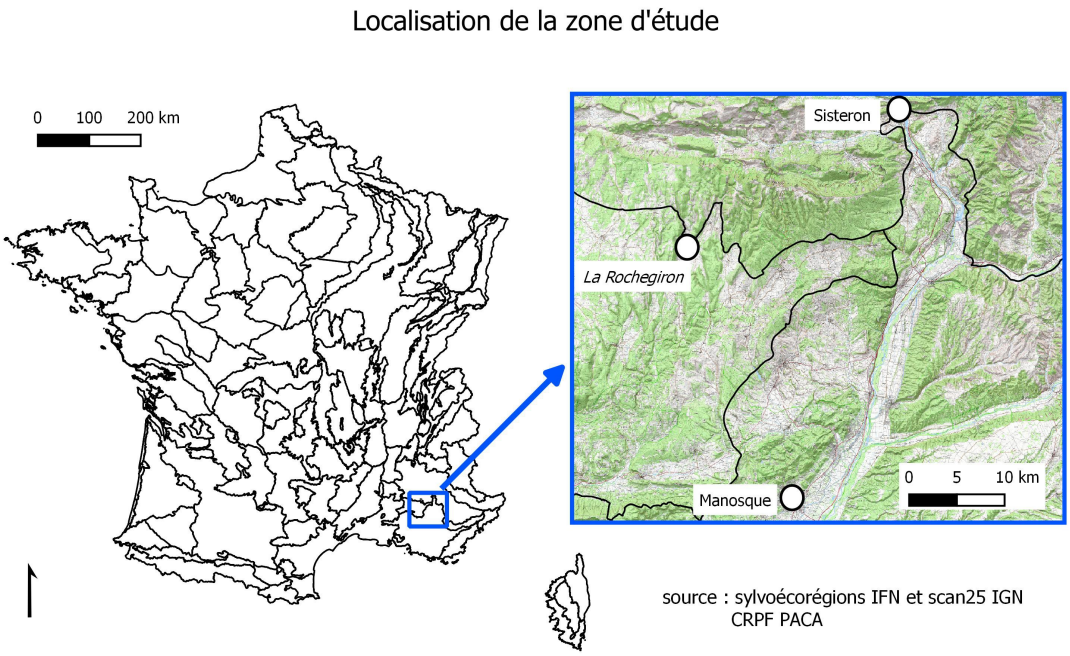


Illustration 1: Carte de localisation de la zone d'étude

représentant une surface d'environ 1 000 ha. Les propriétaires ont ainsi entamé, grâce à l'animation réalisée par le CRPF PACA, une concertation visant une gestion durable et multifonctionnelle cohérente à l'échelle du massif. Cela a abouti à l'agrément d'un plan simple de gestion (PSG) concerté pour la période 2008-2017. Le caractère multifonctionnel de la gestion est inhérent à ce contexte sylvo-pastoral de Provence. La gestion forestière y est un outil devant s'adapter aux exigences de production de bois mais aussi pastorales, cynégétiques, paysagères, environnementales, *etc*. Les interventions qui ont fait suite ont clôturé une période d'inaction forestière de plusieurs décennies ayant conduit à un déficit de gestion très important. Nous nous sommes donc concentrés sur ce territoire où la démarche de concertation est la plus aboutie dans le région ce qui facilite grandement les actes de gestion. Des coupes y ont déjà été pratiquées dans ses hêtraies d'arrière pays méditerranéen pour lesquelles peu de recul existe quant à leur potentialités. Le mode de gestion mis en œuvre y étant relativement nouveau localement, il est d'autant plus intéressant de l'étudier, y compris sous l'angle des enjeux les plus actuels dont le carbone.

Nous nous focaliserons sur les taillis de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) bienvenants. Ce type de peuplement défini par le schéma régional de gestion sylvicole (SRGS, fiche n° 273412) est notamment susceptible de conversion vers la futaie par des coupes de balivage produisant une futaie sur souche transitoire. Le périmètre de l'ASL du Tréboux comprend, d'après le PSG, 235 ha de « taillis de hêtre bienvenant » dont la localisation est représentée ci-dessous.

Les peuplements se situent entre 1 200 et 1 500 m d'altitude sous un climat méditerranéen à influence montagnarde. En effet, le diagnostic du milieu naturel exposé dans le PSG précise que le secteur bénéficie de déficits hydriques limités pour la région (notamment en été) grâce à des précipitations de 1 000 à 1 300 mm/an et des températures moyennes fraîches variant de 6 à 10°C selon l'altitude (ASL « le Tréboux », 2007). Le hêtre, bien que globalement en limite de son aire de répartition nationale, y fait preuve de potentialités non négligeables par rapport aux autres essences envisageables. Il y profite d'une légère humidité atmosphérique formée à la faveur de la topographie. De plus, le substrat géologique est

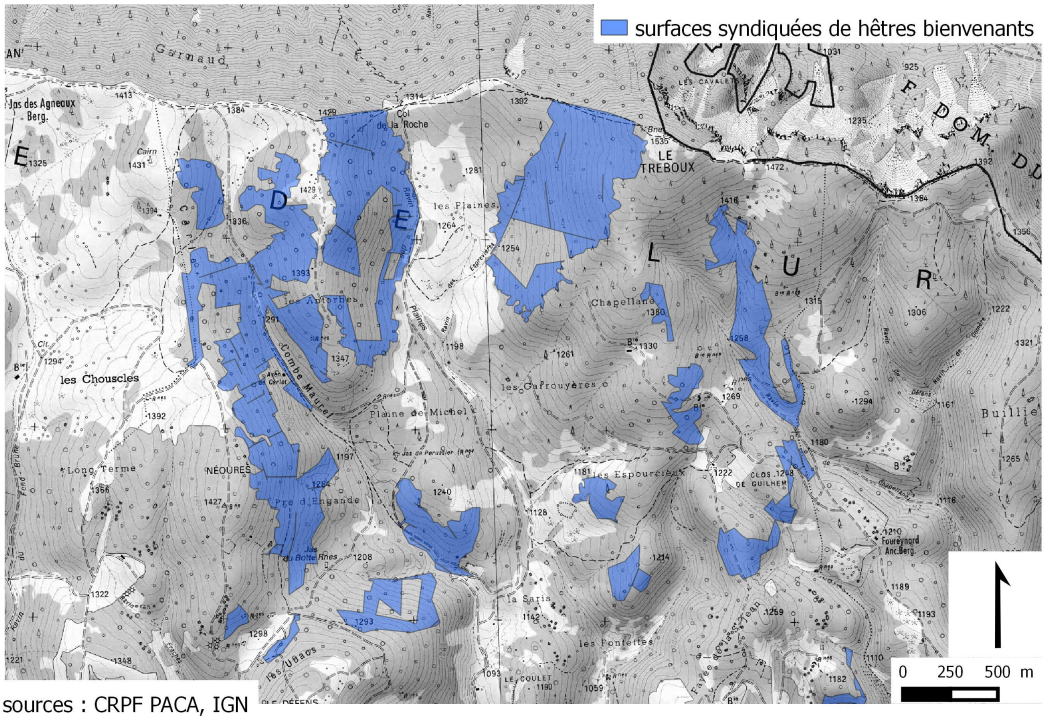


Illustration 2: Carte des parcelles syndiquées portant des peuplements de hêtres bienvenants

relativement friable favorisant ainsi l'enracinement ce qui détermine – à l'échelle du versant en plus de l'altitude et de la topographie à une échelle plus large – en grande partie le classement ou non dans la catégorie de classe de fertilité bienvenante. En revanche, la situation de crête conduit à une exposition aux vents pouvant être violents et qui, associés à des neiges lourdes, peuvent produire d'importants dégâts.

Les recettes de l'ASL proviennent, entre autres, des partenariats développés avec l'éleveur qui exploite cette unité pastorale et de la société de chasse. Les statuts prévoient aussi une mise en réserve de 10 % du montant des ventes de bois. Le bois étant, pour l'heure, valorisé exclusivement en bois énergie (bûche ou plaquette forestière) la capacité de financement et d'investissement en est limitée d'autant. C'est pourquoi une démarche de valorisation des services écosystémiques serait un réel atout pour l'association dans le cadre d'une gestion multifonctionnelle de massif et de recettes de bois limitées. Cela permettrait de dégager de la trésorerie par exemple pour l'entretien des réalisations passées (desserte, amélioration pastorale, restauration de bâti en pierre sèche, défense de la forêt contre l'incendie, *etc*) mais aussi pour éventuellement financer la maîtrise d'œuvre d'interventions complexes devant répondre au faisceau d'enjeux (gestion forestière innovante pour la région, équipements d'accueil du public, *etc*). Cela aboutirait, en tous cas, à une véritable reconnaissance des services répondant à un intérêt général plus que particulier. Enfin, une valorisation économique constituerait une incitation pour les propriétaires à rester dans la démarche et un exemple incitatif à l'attention d'autres regroupements voisins.

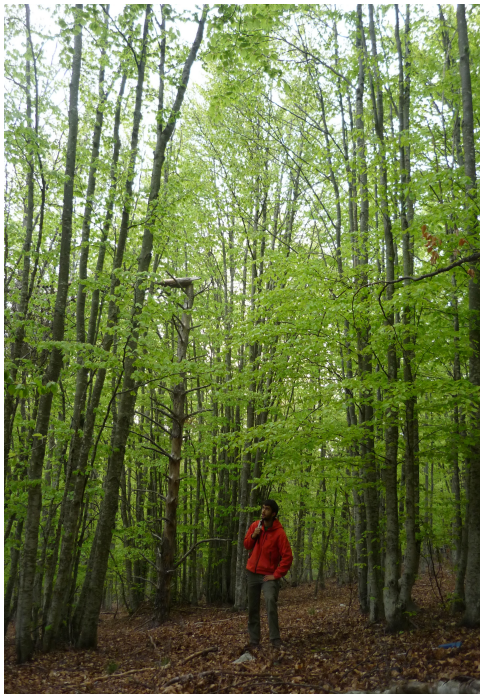


Illustration 3: Taillis de hêtre bienvenant avant intervention. Crédit photo : Marie de Guisa

L'intérêt pour l'ASL de l'étude est multiple et réside, notamment, dans une meilleure connaissance de ses hêtraies (environ un quart de la surface gérée). Elle constitue une évaluation du retour sur expérience disponible des conversions vers la futaie déjà entreprises qui pourra aider à la décision de poursuite ou non dans ce sens lors de l'élaboration du prochain PSG. Une démarche carbone aboutie serait aussi une reconnaissance forte de la qualité de la gestion durable des forêts qui vient de faire l'objet d'une labellisation par PEFC.

Pour le CRPF, réaliser une telle étude permet de mettre en pratique l'expertise « carbone » répondant à la problématique du changement climatique. Si le projet aboutit, il créera un précédent en région PACA de valorisation des services écosystémiques produits par les forêts et pourra être la source d'un développement plus large, possible outil d'application de la politique forestière. Nôtre travail pourra aussi participer à étoffer l'expertise sur la gestion des peuplements de hêtres qui posent de nombreuses questions sur leur traitement mais aussi sur leurs débouchés. D'autant que la conversion offre une alternative intéressante aux coupes rases de taillis. L'ASL du Tréboux se prête particulièrement à l'accueil du sujet du fait des coupes déjà réalisées mais aussi – et surtout – du regroupement qui offre des unités de gestion de grande surface permettant de caractériser les taillis de hêtre à une échelle plus large que la parcelle cadastrale. Le regroupement est aussi un atout indispensable pour le montage d'un projet carbone (voir paragraphe suivant).

1.2 Contexte des marchés du carbone

Sont présentées ici les caractéristiques des marchés du carbone qui impactent directement la stratégie d'un porteur de projet forestier par les blocages, opportunités et demandes qu'ils suscitent. Il convient toutefois, en préalable, de décrire le contexte international et national afin de mettre en avant la pertinence du service de séquestration de carbone.

En 2007, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, IPCC en anglais) faisait état d'une élévation de la température moyenne à la surface du globe de 0,74°C entre 1906 et 2005 (GIEC, 2007). Le rôle prédominant des émissions humaines de gaz à effet de serre (et en premier lieu le dioxyde de carbone (CO_2)) dans ce réchauffement ne fait plus vraiment de doute au sein de la communauté scientifique. Cela a déjà de nombreuses conséquences sur l'environnement (augmentation du niveau de la mer, fonte des neiges, *etc*) et sur les activités humaines qui en dépendent. L'enjeu de maîtrise de ces émissions est à l'échelle du globe : la localisation de l'émission (ou de son évitement) n'influe pas sur l'évolution prédite globale du climat. La Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et le protocole de Kyoto définissent le cadre international d'objectifs de réduction des émissions et donc d'atténuation des changements.

Si l'on se concentre sur le cas de la France, le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA) est en charge du suivi des émissions et de leur déclaration dans le cadre de Kyoto. Il fait état d'émissions s'élevant à **6 tCO_2 par habitant en 2010**. Les émissions ont été réduites de 15,9 % entre 1990 (date de référence dans le protocole de Kyoto) et 2012 pour atteindre 302 $MtCO_2$/an déduction faite du secteur « Utilisation des terres, leurs changements et la forêt » (UTCF) (CITEPA, 2014). Celui-ci constitue un puits de carbone pour lequel **la forêt française contribue à hauteur de 65 $MtCO_2$/an séquestrées** du fait de l'augmentation de ses surfaces et du volume par unité de surface (CITEPA, 2013). A noter que seule une infime partie de ce puits est comptabilisée dans le cadre de Kyoto.

Il apparaît donc clairement que la forêt française a un rôle important à jouer dans la stratégie d'atténuation des changements climatiques. En cela elle offre un véritable service écosystémique en fixant le CO_2 grâce à la photosynthèse. Ce service a d'ailleurs été identifié comme objectif de gestion dans le nouveau code forestier (article L121-4 du Code forestier). Cet article souligne aussi le rôle de production d'énergie

renouvelable des forêts. En effet, une analyse globale des bilans carbonés de la gestion forestière ne peut se cantonner au seul **stock en forêt** mais se doit de prendre aussi en compte le **stock dans les produits bois** et les effets de **substitution** à des énergies ou des matériaux bien plus émetteurs. Cela constitue les « 3S » objets des analyses dans les méthodes développées par la forêt privée (Forêt privée Française – Institut du développement forestier).

1.2.1 Des marchés réglementaires vers les marchés volontaires : blocages impliqués

Le protocole de Kyoto engendre un marché de la tonne de CO_2, conséquence de l'atteinte ou non des objectifs que se sont fixés les États. Ceux qui font mieux peuvent revendre le carbone à ceux qui ne les atteignent pas. Il est aussi possible, grâce aux mécanismes de flexibilité, pour atteindre les objectifs, de financer des projets de réduction d'émissions « à domicile » (comprendre dans les pays du Nord par la procédure MOC : mise en œuvre conjointe) ou dans des pays en développement par le mécanisme de développement propre (MDP). Ces projets sont très encadrés et formalisés et aboutissent à de l'achat de tonnes de CO_2 validées par la procédure. Pour le volet forestier de tous ces projets, sont visés :

- l'évitement de la déforestation (dont projets REDD : *Reducing emissions from deforestation and forest degradation*)
- le boisement (parfois reboisement) de terres non boisées en 1990.
- *l'amélioration de la gestion forestière*

Nous nous plaçons dans ce dernier cas qui concerne les terres boisées en 1990 et qui le sont toujours. Aujourd'hui elle n'est pas encore possible dans le cadre réglementaire et est uniquement mise en œuvre par les marchés volontaires.

Ces projets sont soumis à des **normes de qualités** qui imposent entre autres :

- L'additionnalité du stockage de CO_2 par rapport à un scénario de référence crédible. Il s'agit aussi de montrer le rôle déclencheur du financement « compensateur » pour la réalisation du projet afin d'éviter au maximum les effets d'aubaine.
- La mesure et le suivi dans le temps des émissions évitées selon une méthodologie certifiée.
- La permanence du stockage.
- Le non double compte (vente de crédits déjà comptés par ailleurs dans les émissions de l'État).

La méthodologie adoptée se doit d'ailleurs de respecter la règle de prudence suivante : lorsqu'un choix ayant un effet sur la quantification doit être fait, nous devons choisir l'hypothèse qui minimise, *a priori*, le bénéfice afin de ne pas surestimer celui-ci, hypothèse dite conservatrice. Nous évitons donc de promouvoir un projet dont les bénéfices sont surévalués. Pour résumer, en cas d'incertitude, nous pencherons de préférence vers l'option la plus prudente.

En découlent de nombreux blocages réglementaires et techniques qui limitent fortement le développement de projets dans ce cadre, surtout en métropole. Projets qui produiraient de réels crédits carbone valorisables sur les marchés dédiés (EU ETS : *European Union Emissions Trading System*). Le cadre réglementaire ne comprend en France que le cas du boisement. Et les premières méthodologies sont en cours de validation par l'État. En outre, la prise en compte des « 3S » est problématique surtout pour les aspects de substitution qui impliquent, en général, du double compte. Les réductions d'émissions dues à l'utilisation de biomasse ou de matériaux bois sont en fait pris en compte dans les émissions des secteurs qui

les utilisent. Au sujet des divers blocages réglementaires et autres, il est possible de se référer à la note *Projets carbone et marchés volontaires – État des lieux* de Simon Martel (2014b).

Les blocages évoqués ne permettent pas, pour l'heure, de s'inscrire dans ce cadre pour des projets métropolitains.

Au delà, s'est donc développé un marché volontaire qui laisse plus de liberté sur les projets. Il existe dans ce cadre des organismes certificateurs (Voluntary Carbon Standard (VCS) étant le plus important) qui valident la méthodologie de calcul et la réduction effective des émissions. Ils s'appuient sur les critères de qualité du cadre réglementaire indiqués précédemment. Les « crédits carbone » sont labellisés et ont donc plus de crédibilité auprès des acheteurs et peuvent faire éventuellement l'objet d'une revente. Les coûts de transaction liés à une labellisation sont élevés et nécessitent donc des projets de grande envergure (ex. : boisement de plusieurs centaines d'hectares) pour être rentables. Nous voyons que c'est clairement incompatible avec la structure très morcelée de la propriété française (même regroupée en ASL) et, à ce jour, il n'existe pas de projet forestier labellisé sur le sol français (Martel et Casset, 2014).

A l'heure actuelle, **nous nous plaçons dans un cadre de « mécénat d'atténuation basé sur des critères de qualité »**. Nous visons donc essentiellement des opérations de l'ordre du mécénat qui ne relèvent pas, à proprement parler, de la compensation des émissions telle que définie par l'Ademe. Nous cherchons donc à apporter une source de financement à des projets forestiers dont le bénéfice en terme de carbone est attesté par une expertise technique au regard des critères d'exigence généraux du cadre réglementaire. Cela afin d'éviter toute dérive d'« écoblanchiment » (ou *greenwashing*, plus couramment utilisé).

Plus précisément, un projet de mécénat d'atténuation consiste en une transaction plus souple entre une entreprise, une collectivité, *etc* ayant réalisé un bilan de ses émissions et souhaitant « compenser » ce qu'elle ne peut pas réduire. En participant au financement d'un projet vertueux en terme de carbone, l'agent économique peut ensuite le valoriser dans sa stratégie de communication. C'est à ce stade que la plus grande prudence est de mise quant à la terminologie.

Dans l'optique de limiter au maximum les cas d'« écoblanchiment », l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) a publié un guide de bonnes pratiques reprenant les principaux critères d'additionnalité, permanence, suivi, *etc* (Ademe, 2012).

Le contexte italien est relativement proche de celui de la France [réunion du Club Carbone Forêt Bois animé par la Caisse des dépôts et consignations Climat Recherche entre autres, le 24 juin 2014]. Lucio Brotto, Responsable du pôle changements climatiques et services écosystémiques d'ETIFOR (centre de recherche et de formation sur les ressources environnementales et forestières), nous a ainsi indiqué qu'en Italie il n'existe aucun projet dans le cadre réglementaire et que les marchés volontaires sont totalement affranchis des grands standards internationaux de certification. C'est pourquoi ils ont développé un « *Forest Carbon Code* » dans l'esprit du guide de l'Ademe mais plus précis dans ses prescriptions (Brotto, 2014).

1.2.2 État des marchés volontaires du carbone

Dans le but d'apporter une vision plus large, nous présentons ici quelques chiffres caractérisant les marchés du carbone forestier dans le monde et en France. Ces chiffres proviennent de la veille réalisée par le Club Carbone Forêt Bois (Deheza et Grimault, 2014a et b).

Au niveau international, pour 2013, la très grande majorité des volumes échangés sur le marché est

issue de projets REDD. Le carbone forestier témoigne d'un certain engouement : alors que le marché volontaire, tous secteurs compris, accuse une diminution des échanges de 25% entre 2012 et 2013, les volumes forestiers échangés ont, eux, augmenté de 15%.

Les tonnes équivalent de CO_2 se sont échangées en moyenne, en 2013 à environ 3 €/tCO_2. Néanmoins, cette moyenne dissimule une variabilité très importante des prix en fonction des projets. Lors de la réunion du Club carbone, une entreprise a même fait état d'une mesure dont le coût est estimé aux environs de 300 €/tCO_2 ce qui illustre bien cette variabilité. Notons que ces échanges se font à des montants très supérieurs aux prix observés sur les marchés réglementaires. Structurellement déséquilibré, le marché européen (EU-ETS) voit les tonnes de CO_2 issues des mécanismes de projet s'échanger à moins de 1 €, voire jusqu'à un cours de quelques centimes début 2014 (Deheza et Grimault, 2014a).

En France, il existe 16 projets ou programmes (dont cette étude) de valorisation de ce service écosystémique plus ou moins avancés. Le type « conversion de taillis en futaie » y prend une place significative. Notons que dans les cas français, les estimations quantitatives sont réalisées à partir de données issues de la littérature (tables de production, guides de sylvicultures, *etc*) : ce projet est donc une première à ce titre car basé sur des mesures. C'est aussi une première par l'originalité des peuplements.

1.2.3 Exigences spécifiques perçues des marchés volontaires

Nous reprenons ici, en partie, la synthèse de Nathalie Wiesman (ECO-ACT : bureau d'étude faisant l'interface pour ce type de projets entre offre et demande) exposée au Club Carbone Forêt Bois.

Globalement, la localisation en métropole des projets est un argument commercial fort offrant davantage de visibilité et de possibilités de contrôle qu'un projet de boisement éloigné géographiquement, dans des États parfois instables, aujourd'hui plus difficile à valoriser dans une stratégie de communication. Nous offrons ainsi la possibilité pour le mécène de faire visiter facilement le site à ses clients.

Un aspect important est le souhait de ne pas financer les projets d'un seul propriétaire ce qui pourrait être suspecté de clientélisme. Le passage par des entités de **regroupement de propriétaires est donc un atout apprécié voire indispensable**.

Pour ce qui est de la méthodologie appliquée à la définition du bénéfice, les exigences – y compris en terme de précision – semblent très variées. Certaines entreprises ont des exigences quantitatives fortes (liées à des exigences contractuelles avec leurs clients) alors que d'autres souhaitent valoriser la démarche globale et les autres avantages du projet (environnement, emplois, *etc*) dans le cadre d'une stratégie de responsabilité sociale des entreprises (RSE). En fait, il semble que les exigences des entreprises dépendent aussi en bonne partie de l'ancienneté de leur réflexion sur cette thématique.

A priori une accréditation par un standard serait un plus mais elle n'est pas forcément exigée.

1.2.4 Stratégie de la forêt privée

Au niveau national, le CNPF et son partenaire Forestiers privés de France, se donnent comme objectif la reconnaissance du rôle du forestier vis à vis des services écosystémiques. La valorisation des services de protection de la ressource en eau et la séquestration du carbone sont ciblés prioritairement. A donc été défini, à travers un groupe de travail dédié, une stratégie globale en réponse à ce que l'on vient d'exposer. Elle est consultable en ligne sur le site de la Forêt privée française (FPF, 2014). Globalement, l'objectif est de favoriser des démarches de gestion qui visent à augmenter la qualité des produits. Le but est d'inciter, par un apport financier, les propriétaires à gérer leur forêt et à produire le plus de bois d'œuvre possible. La gestion est ainsi vertueuse au sens des « 3S » : stock en forêt, dans les produits bois (dont on

cherche à augmenter la durée de vie) et la substitution. La seule prise en compte du stock en forêt est exclue car elle conduirait à des effets d'aubaine forts et à des stratégies capitalisantes à l'heure où les exigences de gestion et de récolte ciblent de plus en plus les marges de progrès en forêt privée.

De plus, le CNPF développe un réseau de compétences et d'expertise sur ce sujet. Il contribue notamment au développement du cadre réglementaire et des opportunités que cela ouvrirait. Ce groupe est partie prenante dans la définition de méthodologies de quantification.

Compte tenu des blocages cités, le souhait de la forêt privée est de démontrer par l'exemple la pertinence de projets de valorisation du carbone. Le marché volontaire, vérifiant les critères de qualité incontournables, parait aujourd'hui le plus à même de répondre à cet objectif. De plus, le but est de développer des projets dits de « gestion forestière améliorée » qui constituent un enjeu plus fort que le boisement à l'échelle nationale. C'est d'ailleurs le type de projet ciblé en priorité par le CRPF PACA qui est confronté au résultats d'une déprise agricole couplés à un déficit de gestion étant à la fois sources de risques (habitat diffus en forêt face au risque incendie) et une perte de ressource pastorale où cette production existe toujours. Le cas du Tréboux illustre bien cette situation.

1.3 Bilan : problématique du stage

Après avoir exposé les éléments de contexte à la fois forestiers et des marchés du carbone, nous sommes en mesure de définir les objectifs et la problématique de l'étude.

Il s'agira de construire les fondements techniques et économiques en visant une contractualisation, à terme, dans le cadre d'un marché volontaire à critères de qualité.

L'objectif est d'évaluer,s'il existe, de la façon la plus précise possible, le bénéfice carbone d'un itinéraire sylvicole cible, issu d'une longue phase d'animation par rapport à une référence supposée qui aurait eu lieu sans le lourd travail d'animation réalisé par le CRPF.

Précisons qu'on ne cherche pas à optimiser un bénéfice carbone, en étudiant un large panel d'options sylvicoles, mais à évaluer celui d'un itinéraire opérationnel faisant consensus et choisi par les propriétaires dans le cadre de la démarche de concertation. Par exemple, l'étude d'un enrésinement, peut-être plus productif, en cèdres n'est pas envisagé car loin de faire consensus localement. Par conséquent, l'évaluation présentée ici se veut très ancrée localement. Nous nous demanderons si la mise en œuvre de cet itinéraire de conversion apporte un bénéfice additionnel.

On s'inspirera de la méthodologie correspondante en cours de développement par la forêt privée afin d'abonder l'argumentaire lié à chaque critère de qualité exigé dans un projet carbone.

Suivent la présentation de la méthode adoptée puis des résultats obtenus.

2 Méthode

Cette partie présente la méthode et les outils mis en œuvre afin d'évaluer le service de séquestration du carbone produit par le balivage des taillis de hêtre au regard (i) des critères de qualité liés aux marchés du carbone mais aussi (ii) d'une analyse économique.

2.1 Comparaison de deux scénarios sylvicoles

La mise en évidence d'un éventuel bénéfice « carbone » nécessite de comparer deux situations : avec ou sans projet. Chaque cas correspond à un itinéraire sylvicole. C'est ainsi qu'on sera en mesure de démontrer l'additionnalité du service rendu par rapport à un scénario de référence. Nous excluons un scénario de non gestion qui ne répond pas à long terme à toutes les exigences du développement durable et parce que nous ne souhaitons pas créer une rente sur un effet d'aubaine.

2.1.1 Choix du scénario de référence

Ce choix est essentiel car il conditionne beaucoup les résultats de l'étude. La référence – ou *baseline* en anglais – se doit d'être un scénario communément admis et pratiqué localement. L'itinéraire choisi est en continuité avec les pratiques passées – *business as usual* – de traitement en taillis simple des hêtraies. C'est le traitement qui leur est appliqué depuis plus de 100 ans.

Nous fixons la durée de rotation des coupes rases de taillis à 50 ans. Ceci étant le résultat d'un compromis entre des rotations historiques de l'ordre de 15 à 20 ans dans la première moitié du XX^{e} pour la production de charbon(nette) (Brocheny, 2014 et Ladier *et al.*, 2007), une période d'inaction constatée de plus 60 ans, un développement de la valorisation énergétique locale (projets industriels de la Commission de régulation de l'énergie) dont on peut penser qu'il conduira à réduire les rotations, et les préconisations du Guide des sylvicultures de montagne Alpes du Sud françaises (GSMAS, Ladier, Rey et Dreyfus, 2012) d'un âge d'exploitabilité compris entre 40 et 50 ans.

L'âge a été déterminé grâce aux anciennes photographies aériennes disponibles sur Géoportail qui situent la dernière coupe rase au début des années 1950 où d'importantes coupes ont été réalisées. La figure ci-dessous (illustration 3) l'illustre pour le versant des Antorbes.

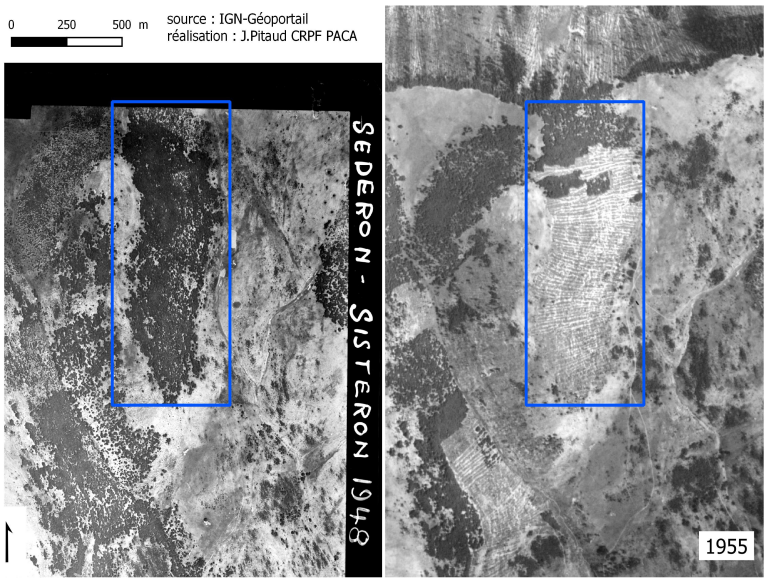


Illustration 4: Comparaison des photographies aériennes de 1948 (gauche) et 1955 (droite), versant des Antorbes.

L'âge des peuplements est donc compris entre 59 et 66 ans, 62 ans étant fixé pour les besoins des calculs.

Précisons que ce traitement est encore une réalité, y compris sur le massif du Tréboux, comme le montre l'illustration 5, témoignant d'une coupe rase récente (7 ans) dans ce secteur. Le taillis simple constitue

un traitement facile de mise en œuvre très répandu dans les peuplements feuillus de la région. Ce traitement est adapté à la faible productivité des forêts méditerranéennes qui ne favorise pas une sylviculture interventionniste exigeant des investissements importants.

Illustration 5: Coupe rase de taillis de hêtre, 7 ans après ; La Rochegiron

Les peuplements du massif peuvent donc être considérés comme exploitables. Par conséquent, ce scénario débute par une coupe rase de ceux-ci dans leur état actuel. D'autant plus que les capacités à rejeter sont estimées incertaines – ou du moins diminuées – au-delà de 70 ans (GSMAS). Suivent des coupes rases tous les 50 ans. La récolte est exclusivement destinée au bois de chauffage.

2.1.2 Scénario alternatif : conversion du taillis en futaie par balivage

L'alternative proposée au taillis est le balivage de celui-ci afin de le convertir en futaie après un état transitoire de futaie sur souche. Biologiquement, nous visons la reproduction sexuée par graines au détriment de la reproduction végétative par rejets de souche. Cet itinéraire reste encore relativement expérimental et il existe très peu de recul localement sur ces opérations. À noter qu'il fait partie des préconisations des documents d'orientation de la gestion : SRGS et GSMAS. L'objectif est alors la production, en regard des potentialités, de bois d'œuvre de qualité courante en conservant les meilleurs sujets et, à long terme, en produisant des billes de pied de meilleure qualité technologique. La démarche a été acceptée par les propriétaires lors de la phase d'animation et a été appliquée à une unité de gestion (versant des Antorbes).

D'un point de vue technique, le tableau ci-dessous présente un déroulé prévisionnel des coupes et leurs caractéristiques. La part de bois d'œuvre est supposée au regard de la qualité attendue, théorique, des bois exploités mais ne présume en rien de leur destination réelle. On pose l'hypothèse que le peuplement tendra vers un équilibre où une tige sur trois récoltées représentera 50 % du volume – car en provenance de l'étage dominant – dont 50 % de grume valorisable en bois d'œuvre. Les deux tiers de tiges autres étant du bois énergie. L'équilibre pourra être atteint progressivement avec l'arrivée progressive des bois au diamètre d'exploitabilité.

Année	Intensité de prélèvement	Part de bois d'œuvre dans le volume prélevé (%)	remarque
2014	60 %	0	*Éclaircie forte de rattrapage. Ouverture de cloisonnements*
2034	40 %	5	*Maintien d'un capital sur pied modéré permettant une régénération protégée par le couvert. Récolte des bois mûrs.*
2054	40 %	10	
2074	40 %	20	
2094	40 %	25	
2114	40 %	25	

L'objectif, plus précisément, est de produire des petites grumes de diamètre 40-45 cm. Elles seront susceptibles de produire des sciages de qualité courante. Ladier (2014) a mis en évidence un accroissement sur le diamètre, après balivage, de l'ordre de 0,4 cm/an sur un dispositif de suivi voisin (contexte stationnel identique en forêt domaniale du Défens). Nous pouvons donc raisonnablement viser, à partir d'un diamètre

moyen actuel proche de 20 cm (voir 3.1), une récolte importante de bois de 40-45 cm dans environ 60 ans soit au quatrième passage. Les arbres récoltés auront alors 120 à 130 ans au-delà duquel il semble risqué de poursuivre (cœur rouge, bille de pied de qualité moyenne en futaie sur souche). Puisque aujourd'hui nous trouvons des bois de 30 cm, nous pouvons nous attendre à récolter ce type de produit, en moindre quantité, dès le troisième passage. Après balivage, la formation de gourmands sur les troncs du fait de l'éclaircie relativement brutale est souvent observée. Cela dégrade un peu la qualité du bois et interdira pour une bonne part les usages les plus nobles mais n'empêche pas la fabrication de petits sciages surtout si les nœuds restent verts.

Les rotations ont été fixées à 20 ans afin de laisser le temps aux arbres de réagir à l'éclaircie et de reconstituer un couvert quasi entier avant la prochaine coupe. Une durée de 15 ans prévue initialement s'est révélée trop courte dans l'expérimentation en forêt domaniale du Défens, le couvert n'étant encore pas complètement ceconstitué (Ladier, 2014). En outre, cela conduit à des prélèvements à l'hectare plus forts donc commercialement plus attrayants et permettant d'envisager un tri des produits (grâce aussi à la grande surface des unités de gestion).

Il est difficile, dans l'état actuel des connaissances, d'anticiper la structure formée à long terme par cet itinéraire. Quelques éléments à ce sujet seront apportés dans le 3.4.2.

2.2 Un réseau de placettes permanentes, outil central de caractérisation et de suivi

L'établissement d'un bilan carboné pour les années à venir suppose d'être en mesure de prévoir l'évolution des peuplements sur une grande durée. Dans un premier temps il nous faut mieux caractériser les volumes – donc les tonnes de CO_2 – présents actuellement en forêt et le prélèvement d'une première coupe de balivage. Puis nous devons anticiper la réaction des peuplements après cette coupe et celles qui suivent ce qui suppose de prédire l'accroissement. Le tout en maîtrisant au maximum les sources d'incertitude sur la base des observations où le balivage a déjà été réalisé.

Il existe très peu de références techniques dans la littérature à propos de ces formations boisées particulières. Les enseignements sur la réaction des arbres après éclaircie du dispositif expérimental de l'ONF semblent facilement transposables puisque extrêmement proches géographiquement, mais il s'agit tout de même de savoir les situer par rapport aux boisements privés qui nous occupent. Cela suppose d'en connaître les caractéristiques dendrométriques.

A partir de ces constats, nous avons ressenti la nécessité d'installer un réseau de placettes *permanentes*. En effet, cet outil répond aux besoins de caractérisation de l'état actuel tout en constituant un outil de contrôle et de suivi dans le temps des hypothèses qui seront formulées. Nous pouvons ainsi étayer les bases techniques d'une valorisation du service de séquestration, mais aussi renforcer sa crédibilité vis-à-vis des tiers en offrant la possibilité de suivre et de contrôler de façon précise l'évolution du peuplement. En plus d'un argument technique, ce dispositif est donc aussi un argument promotionnel dans la démarche de paiement du service écosystémique. De plus, il constitue un atout pour les propriétaires qui disposent ainsi d'un véritable outil d'évaluation de leur patrimoine et de la gestion. Concernant l'aspect commercial, ce projet carbone est actuellement le seul en France à faire appel à un réseau de placettes permanentes.

L'idéal aurait été d'installer un réseau formant un échantillon statistique représentant au mieux les 200 ha potentiellement concernés. Le réseau de placettes doit répondre à des exigences de précision mais aussi de coût limité. Un réseau trop coûteux à installer le sera aussi à suivre, compromettant dès le départ les possibilités de suivi. Le parti a été pris de développer un protocole simple de mise en œuvre mais qui apporte les informations nécessaires à des évaluations précises. Il produira aussi des données techniques sur ces formations encore peu caractérisées. Concernant l'implantation des placettes, j'ai choisi de les garder

relativement regroupées pour limiter les coûts de cheminement. Ainsi, le réseau est formé de 4 ensembles de placettes à raison d'1 placette/ha. Les placettes sont à rayons fixes (deux rayons concentriques en fonction des dimensions des arbres : 9 et 18 m) par souci de simplicité par rapport à des placettes relascopiques et pour anticiper les futures densités de tiges plus faibles. Chaque ensemble s'étend sur une dizaine d'hectares pensés comme des cas d'étude bien caractérisés auxquels on rapprochera les peuplements alentours suivant leur proximité, leur situation topographique, voire des mesures complémentaires si besoin. La répartition des ensembles prend en compte, par anticipation, la variabilité des situations (exposition, situation topographique).

La carte ci-dessous présente la localisation prévisionnelle des placettes. Le protocole de mesure et le schéma des mesures sur les placettes sont disponibles en annexe 1. Nous avons transmis au CRPF PACA et à l'ASL du Tréboux le rapport détaillé d'installation permettant une remesure.

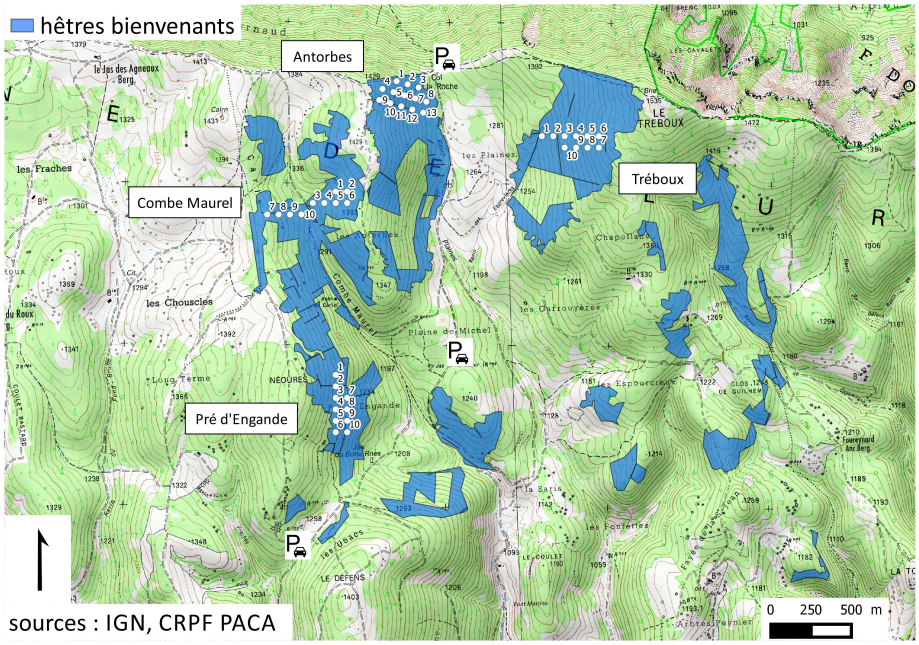


Illustration 6: Carte de localisation prévisionnelle des placettes permanentes.

Au total nous avons installé **43 placettes permanentes** sur 4 ensembles (un site de 13 puis trois de 10 placettes).

La matérialisation des placettes se doit d'être discrète afin de ne pas modifier le comportement des opérateurs à leur voisinage (ce qui pourrait créer un biais) tout en étant facile à retrouver. C'est pourquoi seuls 3 arbres sont marqués au pied à la griffe d'une croix : signe très discret mais précieuse aide pour cheminer lorsqu'on sait qu'on les cherche. Ils sont localisés en azimut et distance pour mieux retrouver le centre. Le centre est constitué d'un fer à béton de 60 cm planté ne dépassant que de 5 à 10 cm en surface afin qu'il ne soit ni dangereux ni source de crevaison pour un engin de débardage.

L'installation a été réalisée au cours du mois de mai 2014 avec la précieuse aide de Marie de Guisa, camarade de classe en stage au CRPF. Cette opération a représenté un coût (hors traitement des données) de **11 hommes.jour**. Si on fait une hypothèse de facturation de la prestation à 500 €/h/j (ordre de coût d'un technicien, déplacement et matériel inclus) qui permet aussi de financer le traitement des données, cela représente un total de **5 500 €**. Il est conçu pour ne nécessiter en remesure qu'un jour à deux personnes par site soient 8 h.j donc environ 4 000 €. Ces montants correspondent, par placette, à un coût d'installation d'environ 130 € et de 95 € en remesure.

2.3 Choix des paramètres nécessaires à la quantification du carbone

2.3.1 Compartiments considérés

Les compartiments et effets faisant l'objet de la quantification du carbone sont de trois ordres. Le premier concerne la séquestration en forêt. Le second, le stock des produits bois et le troisième est lié à l'effet de substitution (émissions évitées par l'utilisation de bois énergie ou matériaux en substitution d'autres sources plus émettrices). Nous n'exclurons un compartiment que si l'on peut montrer que ce choix ne conduit pas à une surestimation du bénéfice carbone engendré par le projet ou qu'elle est très négligeable.

Par conséquent, nous nous intéresserons à la biomasse ligneuse aérienne comprenant les arbres précomptables (diamètre > 7,5 cm à 1,30 m). Cela exclut la biomasse du sous-bois (herbacées, buissons, *etc*) qui représente une part négligeable du total et dont l'effet du traitement sur la quantité est complexe à anticiper.

Le carbone du sol et l'humus ne sont pas pris en compte. Sa quantité est très importante à l'échelle de l'écosystème mais la réaction de ce compartiment est très peu documentée. De plus, nous pouvons supposer qu'une coupe rase de taillis conduit à une minéralisation de ce carbone plus importante (mise en lumière, augmentation de température) que si le couvert était maintenu ce qui en fait une hypothèse conservatrice. Il s'agit surtout d'une hypothèse simplificatrice excluant un compartiment sur lequel l'homme a peu de prise sur son fonctionnement : on le considère constant quel que soit l'itinéraire malgré le fait qu'il semble que les sols forestiers contiennent une grande quantité de carbone. Dans la même idée, le bois mort au sol est exclu, considéré comme appartenant à l'humus. On ne prendra donc en compte que le bois mort sur pied précomptable.

Le dernier compartiment en forêt est la biomasse racinaire. Sa prise en compte est délicate car elle est très peu documentée et difficile à mesurer. Le plus souvent, nous utilisons un coefficient d'expansion qui la relie proportionnellement à la biomasse aérienne de l'arbre. Le problème ici provient de la nature des coupes, qu'elles soient rases ou d'éclaircie, dont on peut imaginer qu'elles conduisent à une conservation des racines – au moins en bonne partie – du système de chaque cépée ce qui conduit à une disproportion entre biomasse aérienne et racinaire après coupe dans une mesure et pour une durée impossibles à caractériser. Nous proposerons donc deux choix possibles quant à son inclusion dans l'analyse qui sont détaillés dans le 3.2.2.

Nous choisissons d'exclure le compartiment des produits bois de la suite de l'analyse. En effet, dans les deux cas, on récoltera majoritairement du bois de chauffage dont le temps moyen de résidence dans le stock est très court (de l'ordre de 1-2 ans). Dans l'hypothèse où le bois d'œuvre serait valorisé en tant que tel et scié, nous ne pouvons espérer des produits d'excellente qualité. Dans tous les cas, nous visons essentiellement le petit sciage pour du coffrage, calage, peut-être de la palette. Si l'on tient compte des rendements au sciage et d'une durée de vie moyenne limitée de ces produits (de l'ordre de 8 ans pour une palette d'après le Vade-mecum du FCBA, 2012) l'augmentation de la durée de vie moyenne du stock sera peu importante et impliquera des quantités limitées. Par conséquent, s'il est clair que la conversion du taillis vers la futaie sur souches est plus vertueuse de ce point de vue, l'impact quantitatif est faible et considéré comme négligeable par rapport à la biomasse en forêt.

Pour l'effet de substitution, nous le prenons en compte à travers les hypothèses de qualité des produits exploités : bois énergie ou bois d'œuvre. Nous nous contenterons d'utiliser un coefficient

communément admis indiquant la quantité d'émission évitée (en équivalent CO_2) par la mise en œuvre de bois plutôt que d'une autre énergie ou d'un autre matériau.

2.3.2 Coefficients de conversion

Nous présente ici les coefficients de conversion utilisés par la suite. Ils permettent notamment de convertir le volume de bois en biomasse sèche, en masse de carbone contenue dans celle-ci, et enfin en équivalent CO_2.

Ils proviennent des recommandations méthodologiques de Forêts privées de France et de l'IDF (Martel, 2014 a et c) et sont principalement inspirés du rapport CARBOFOR (Loustau, 2004) et des recommandations du GIEC.

- Infradensités (tonne de matière sèche / m^3 de bois vert) :

hêtre : 0,58

sapin : 0,4

pin sylvestre : 0,42

- taux de carbone dans la biomasse sèche : 0,475
- masse de dioxyde de carbone équivalente à une masse de carbone :

$$\frac{masse\ molaire\ du\ CO_2}{masse\ molaire\ du\ C} = \frac{12 + 2\times 16}{12} = \frac{44}{12} \approx 3{,}67$$

- coefficient d'expansion racinaire (biomasse totale / biomasse aérienne) :

feuillus : 1,28

résineux : 1,30

En plus de ces coefficients nécessaires à la quantification du carbone, nous ajoutons un coefficient permettant de déduire le volume bois fort arbre (découpe 7 cm, branches comprises) qui est un volume commercial. On considérera, d'après Vallet *et al.* (2006) pour le hêtre (et les autres feuillus) que la part des fines branches (moins de 7 cm de diamètre) dans le volume total est d'environ 20 %. Ce coefficient est nécessaire pour les analyses économiques qui se réfèrent à des volumes commerciaux.

La substitution est quantifiée par deux coefficients issus de la note méthodologique de Martel (2014c). Le premier, calculé par l'Ademe à partir d'une revue bibliographique, correspond aux émissions évitées par l'utilisation de bois énergie. Il semble faire consensus et prend en compte le bouquet énergétique français[1]. Nous considérons qu'un mètre cube de bois valorisé en énergie permet d'éviter l'émission de 0,457 tCO_2. Pour le bois matériau, il faudrait, en toute rigueur, avoir une idée des produits transformés qu'il est possible d'obtenir, des rendements de transformation et du mix de matériaux auxquels ils se substitueraient ainsi que les analyses de cycle de vie de chacun des matériaux et les émissions associées. Vu les incertitudes auxquelles nous sommes confrontés, ce travail n'a pas été fait. Nous avons utilisé le coefficient proposé par Martel : 0,8 tCO_2 évitées par l'utilisation d'un mètre cube de bois rond dans le secteur de la construction. Il est clair que ce coefficient ne fait pas consensus mais il est utilisé faute de mieux pour un compartiment de l'étude dont les bénéfices, nous le verrons, sont négligeables.

1 Il existe quelques éléments de débat au sujet de la controversée « neutralité carbone » du bois énergie dans l'article de Leturcq (2013).

2.3.3 Tarifs de cubage

Afin de caractériser chaque scénario sylvicole en terme d'effets sur le carbone atmosphérique, il s'agit, entre autres, d'évaluer la quantité de biomasse aérienne de la façon la plus précise possible. Compte tenu de l'existence de coefficients de conversion fiables, il s'agit en fait de déterminer le volume total de bois.

Pour se faire, nous devons choisir un tarif de cubage. Plusieurs possibilités étant à disposition, je livre ici les avantages et inconvénients de chacune.

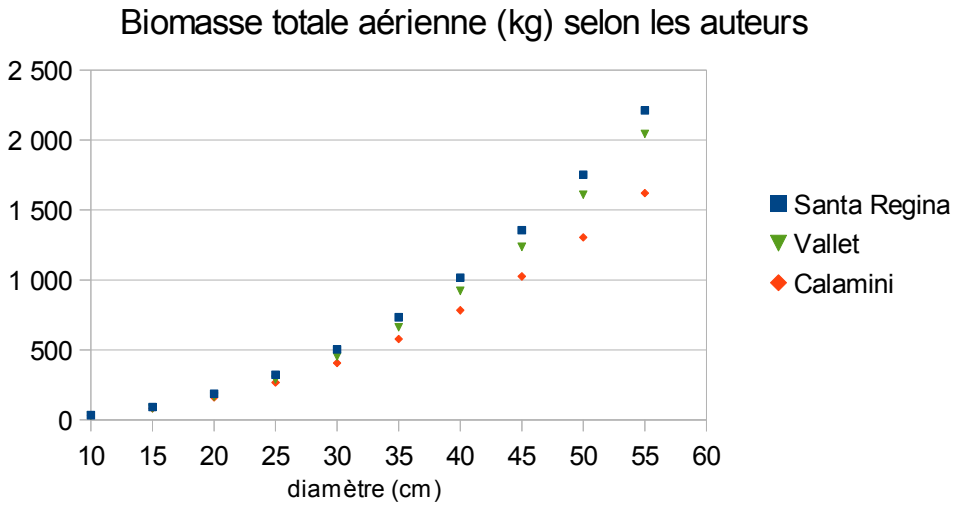
Il est possible, en première approche, d'utiliser un tarif de cubage « classique » de type Schaeffer. Cela implique des incertitudes concernant le choix du tarif et de son numéro. De plus, ces tarifs sont couramment utilisés pour évaluer le volume bois fort tige (≥ 7 cm) et nécessitent l'utilisation supplémentaire d'un coefficient d'expansion branche pour les parties fines – source éventuelle de biais.

Des équations allométriques prédisant le volume aérien total sont disponibles dans la littérature pour le hêtre et constituent *a priori* une meilleure alternative car l'estimation se fait en une seule étape. En France, il est recommandé, notamment dans le rapport CARBOFOR (Loustau, 2004), d'utiliser les équations de Vallet *et al.* (2006). Elles offrent l'avantage de calculer le volume total aérien de sept grandes espèces forestières françaises à partir du diamètre et de la hauteur. Si elles ont été calibrées sur un grand nombre d'arbres, la question de la représentativité des peuplements échantillonnés se pose. Pour le hêtre, le paramétrage a été réalisé à partir de données majoritairement du Nord-Est de la France et de la Montagne Noire. Néanmoins, en introduisant la *hardiness* – ou robustesse – dans le calcul du facteur de forme, on peut s'attendre à une relative universalité de la formule pour l'essence considérée puisque l'élancement des arbres est pris en compte. C'est d'ailleurs ce qui a été prouvé par le projet EMERGE (Chevalier *et al.*, 2013), montrant par les données de l'Inventaire forestier national que la formule est applicable à tous les peuplements nationaux, y compris les hêtraies de montagne, sans biais.

Aux équations de Vallet *et al.*, il est souhaitable de comparer deux équations allométriques disponibles sur la plate-forme en ligne *GlobAllomeTree* (FAO, DIBAF et CIRAD, 2013) obtenues sur le hêtre, en contexte méditerranéen à influence montagnarde en Espagne (Santa Regina et Tarazona, 2001) et en Italie (Calamini et Gregori, 2001). Celles-ci donnent directement la biomasse sèche aérienne. Le contexte expérimental en Espagne est plus proche du nôtre (substrat calcaire contre acide et plus arrosé en Italie) mais porte sur moins d'arbres (7 contre plus de 60).

Pour les équations à double entrée, nous modéliserons la hauteur de l'arbre à partir du diamètre et des relations obtenues entre ces deux grandeurs grâce aux mesures de terrain (cf. 3.1).

La figure ci-après présente les prévisions de biomasse aérienne pour le site de la Combe Maurel selon les équations utilisées.

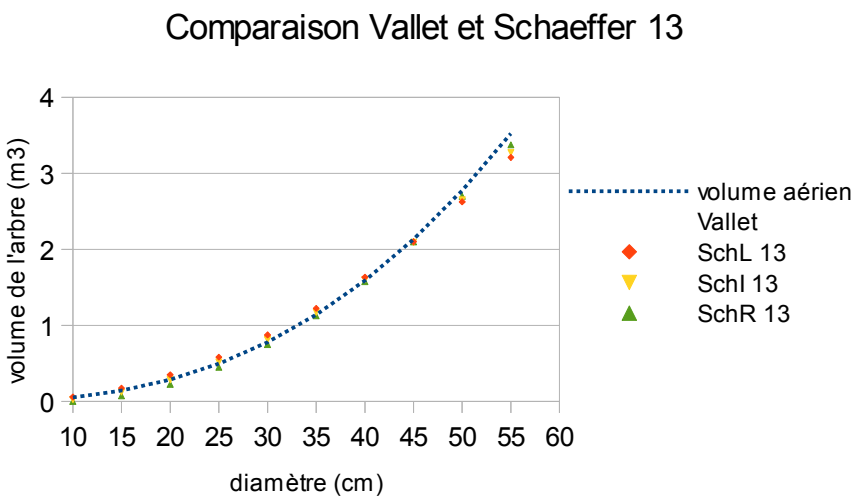


Étant donnés les éléments de discussion présentés et les courbes ci-dessus, **nous avons fait le choix d'utiliser les formules de Vallet *et al.*** Celle de Santa Regina pourrait être utilisée mais il s'agit aussi d'une hypothèse plus prudente de choisir Vallet *et al.* afin de ne pas surestimer le bénéfice carbone du projet. Pour les autres essences présentes dans les peuplements étudiés, nous utilisons celle du hêtre pour les feuillus et les équations de Vallet *et al.* relatives au pin et au sapin pour ces dernières. Pour toutes les essences, nous faisons l'hypothèse que la hauteur varie de la même façon que chez le hêtre en fonction du diamètre faute de données plus précises.

Les formules des équations citées sont disponibles en annexe n° 3.

En complément, dans le cas qui nous occupe, nous sommes en mesure de choisir un tarif Schaeffer (1949) correspondant au mieux à la formule de Vallet *et al.* Il s'agit d'un tarif intermédiaire numéro 13 qui surestime en moyenne de 0,1 % le volume des arbres de 45 cm et moins par rapport à Vallet *et al*. La figure ci-dessous illustre la comparaison avec les tarifs Schaeffer rapide (SchR), lent (SchL) et intermédiaire (SchI) de numéros 13.

S'agissant du **bois mort sur pied**, la classe de dégradation 1 (annexe n° 1) est supposée avoir conservé la totalité de sa biomasse sèche (fines branches encore présentes). Pour les catégories de décomposition 2 et 3 nous ne retienons qu'une part empirique du cubage équivalent en bois vivant respectivement : 75 % et 65 %. Les chandelles sur pied (4) sont considérées comme des cylindres de diamètre relevé à 1,30 m et de hauteur évaluée sur le terrain.



2.3.4 Calculs économiques et hypothèses associées

Comme nous l'avons dit au début du 2., nous devons mener de front une analyse en terme de carbone mais aussi une analyse économique de la question. Les hypothèses de calcul sont présentées ici et ont été compilées dans un tableur permettant la scénarisation. La donnée d'accroissement a un impact fort sur les calculs économiques mais elle est explicitée de façon détaillée dans le 3.2.1. La totalité de l'analyse est réalisée **en euros constants** de 2014 (donc hors inflation).

Le prix du **bois de chauffage** est fixé à **13 €/m³** sur pied, prix de vente constaté dans le cadre de l'ASL ces dernières années.

Concernant le bois d'œuvre de hêtre, la filière régionale ne semble pas en mesure, actuellement, de le valoriser en tant que tel (Agreste PACA, 2012). D'autant que le marché français du hêtre est plutôt en situation de marasme. Il existe peu de références locales. Par conséquent, nous utilisons les prix diffusés dans *Forêts de France* (Toppan, 2014), dans la marge basse pour anticiper empiriquement un surcoût de transport vers une autre région ou une moindre qualité des bois par rapport à la moyenne française (surtout pour le déroulage). Vu les incertitudes, nous évaluerons la production de bois au regard de trois scénarios de prix du bois d'œuvre : pessimiste, réaliste, optimiste :

- **pessimiste** : n'émerge aucune possibilité de valorisation en sciage à moyen terme ; le débouché énergétique reste dominant. **14 €/m³** sur pied.
- **réaliste** : on suppose que le bois d'œuvre se compose en qualité (et sera valorisé ainsi) de 50 % de plot de second choix (qualité[2] C en 3 mètres minimum, diamètre 45 et +) à 25 € ; 50 % d'avivés (qualité C en 2 mètres minimum, diamètre 35 et +) à 17 €. **22 €/m³** sur pied.
- **optimiste** : à la faveur d'une augmentation importante de la demande et d'une structuration locale de la filière, le bois est valorisé avec 25 % de déroulage (qualité B en 2,5 mètres minimum, diamètre 45 et +, sans cœur rouge) à 55 € , 50 % de plot de second choix , 25 % d'avivés. **30 €/m³** sur pied.

À noter que la capacité de tri supposée par les scénarios réaliste et optimiste sera facilitée par la surface importante des unités de gestion issues du regroupement des propriétaires (plusieurs dizaines d'hectares). Il semble aussi, d'après Vincent Brocheny (2014), ancien Responsable d'unité territoriale local de l'Office national des forêts, que des grumes de hêtre en versant Nord de Lure – stationnellement plus favorable que notre site d'étude – aient été vendues à destination du déroulage à la fin du XX^{e} siècle.

Les frais de gestion sont considérés comme nuls dans le cas du taillis. Dans le cadre de la conversion, nous estimons le surcoût de gestion lié au marquage (zone de démonstration puis choix laissé au jugement du bûcheron) et au suivi des exploitations, plus complexe, à 125 €/ha par coupe. A titre de comparaison, l'ONF marque ce type de coupe en général en plein et en réserve (à la griffe) au coût d'environ 1 homme.j/ha soit autour de 500 €/ha (Vuillermoz, 2014 ; prix approximatif de facturation externe d'une journée de technicien ONF). Nous avons retenu arbitrairement le quart de ce montant pour la modalité proposée.

Les frais fixes comme la taxe sur le foncier non bâti ne sont pas pris en compte car ils ont le même effet sur le résultat, indépendamment du choix sylvicole.

Afin d'actualiser les flux financiers pour rendre compte d'une préférence pour le présent, d'une exigence de rentabilité et des incertitudes à long terme, nous utiliserons plusieurs niveaux de taux d'actualisation. Nous pourrons alors comparer les résultats au regard de ce paramètre variable auquel les résultats sont, en général, très sensibles. Le taux d'actualisation variera dans une gamme de 1 % (nouveau

2 D'après la norme EN 1316-1 : Bois rond feuillus – Classement qualitatif – Partie 1 : Chêne et hêtre (1997)

taux de rémunération du livret A) à 4 %.

2.4 Critère(s) de comparaison

Voici ici les critères nécessaires à la comparaison synthétique des itinéraires sylvicoles.

2.4.1 Critères économiques

La comparaison économique des deux scénarios se fera à travers le bilan actualisé en séquence infinie (BASI). Bien que les durées de projet pourraient être égales à 100 ans (faisant coïncider 5 rotations de 20 ans en balivage et 2 rotations de 50 ans en taillis) l'utilisation du BASI permet de s'affranchir d'un choix de durée d'analyse arbitraire. Il consiste à sommer tous les flux financiers anticipés grâce à une série infinie.

De façon générale, on rappelle donc que :

$$BASI = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{R_i - D_i}{(1+r)^i}$$

avec :

- i : l'année ; 0 est le présent
- R_i et D_i : les revenus et dépenses de l'année i
- r : le taux d'actualisation annualisé

Dans le cas d'un flux F fixe réalisé à échéances fixes (toutes les N années), le premier ayant lieu l'année N, le BASI correspondant, une fois la série infinie simplifiée, devient :

$$(1) \quad BASI = \frac{F}{(1+r)^N - 1}$$

Cette formule sera largement mise à contribution pour la répétition des flux dans la cadre du taillis (N vaut alors 50 ans), mais aussi du balivage car on fait l'hypothèse de l'obtention après 5 passages d'une structure étagée plutôt stable dans le temps et conduisant à des revenus fixes tous les 20 ans.

Si ce flux est annuel ($N = 1$), on obtient :

$$(2) \quad BASI = \frac{F}{r}$$

Dans ce cas, le premier flux est versé l'année 1. S'il y a un premier flux dès à présent (année 0), le BASI devient alors :

$$(3) \quad BASI = F + \frac{F}{r} = \frac{F}{r} \cdot (1+r)$$

Le BASI constitue le montant du capital initial qui, rémunéré à r % engendrerait les flux identifiés. Il forme donc des estimations de la valeur du patrimoine forestier – sensible au choix subjectif du taux.

2.4.2 Critères « carbone »

Pour la comparaison des **stocks sur pied en forêt**, nous pouvons mobiliser plusieurs notions complémentaires.

La première est le *bénéfice potentiel d'atténuation* (BPA) repris de Martel et Casset (communication personnelle, 2014). Il s'agit du stock moyen sur pied prévu à l'équilibre (si le projet suppose une phase de transition) et à l'échelle de la vie du peuplement (la révolution). Il correspond à la différence des stocks sur pieds moyens que nous pensons constater sur une période correspondant à un motif périodique (ex. 50 ans pour le taillis).

Le second concept, *a priori* nouveau, que je souhaite introduire ici pourrait être nommé *BASI « Carbone »* ou BASIC. Nous partons de l'hypothèse qu'il y a aussi une préférence pour le présent à séquestrer du carbone. En effet, dans une stratégie d'atténuation des changements climatiques, il y a intérêt à réduire les émissions de gaz à effet de serre au plus tôt et de ne pas réagir une fois des augmentations fortes de températures constatées à la fin du siècle. De plus, il y a, on le verra de façon plus approfondie ensuite, des incertitudes pouvant devenir importantes à long terme. Nous pouvons donc voir un intérêt à l'actualisation des flux de carbone en considérant qu'une tonne de CO_2 séquestrée en 2014 n'équivaut pas à la même tonne séquestrée dans 100 ans qui est entachée de risque et éventuellement moins « utile » pour une politique forte d'atténuation.

Il en résulte que si nous sommes en mesure d'anticiper les flux annuels de carbone liés à l'accroissement des arbres et à leur exploitation, tout en ayant une idée de l'incertitude impliquée, nous pouvons alors calculer un bilan actualisé « carboné ». Et, comme on vient de le voir, si l'on prévoit une succession de motifs périodiques simples, il est possible de calculer un bilan en séquence infinie : le BASI Carbone. Puisque nous avons vu que le BASI correspond à un capital, nous construisons ainsi un « capital carbone » propre à chaque itinéraire sylvicole. Nous pouvons alors les comparer sur cette base. L'inconvénient évident de cette notion est sa sensibilité au choix du taux d'actualisation.

Précisons que, par construction, le bénéfice potentiel d'atténuation correspond au BASIC avec un taux de 0 % c'est-à-dire sans actualiser.

Enfin, pour les stocks sur pied, nous pouvons introduire un dernier type de bilan. Celui-ci découle du montage proposé par l'arrêté ministériel du 27 décembre 2012 relatif aux projets de (re)boisement dans le cadre du UTCF. Le nombre de crédits délivrables (Q) est calculé sur la base annuelle suivante :

$$Q = 0{,}90 \cdot \frac{1}{26} \cdot \delta$$

δ étant l'écart instantané entre le stock au sein du projet et celui du scénario de référence. Le facteur 0,90 consiste, comme il est d'usage, à retirer 10 % du bénéfice pour prendre en compte les risques liés au projet (incertitudes quantitatives, risques de fuite ou de non permanence). Le facteur 1/26 provient en fait d'un calcul actuariel. En effet, à 4 % (taux public) il est équivalent de rémunérer une rente annuelle infinie (notion de permanence) à hauteur du 1/26 – le flux annuel constant (cf. 2.4.1 formule (3)) – et de payer aujourd'hui l'entièreté de la tonne stockée. Le BASI correspondant à cette rente est $\frac{1/26}{0{,}04} \cdot 1{,}04 = 1$ soit le paiement d'une tonne aujourd'hui.

Par conséquent, la somme à l'infini des 26^{e} d'écarts actualisés constitue aussi une forme de « capital carbone ». Il est équivalent au BASIC, pour un taux de 4 %.

Puisque le choix du facteur 1/26 ne fait pas consensus dans le secteur des marchés du carbone, nous étudierons aussi le même montage avec un facteur 1/100. Il est supposé donner plus de poids au futur car équivalent au BASIC pour un taux d'actualisation de 1,01 %.

Le lecteur pourra trouver quelques éléments de cadrage et de débat sur la prise en compte du long terme dans les calculs économiques publics en annexe n^{o} 4 ainsi que dans la bibliographie.

La comparaison des effets de substitution de chaque scénario repose sur les hypothèses de récolte (en quantité et qualité) sur 100 ans. Nous leur appliquons ensuite les coefficients du 2.3.2. La quantité d'émissions évitables sur 100 ans peut être ramenée à un indice de substitution annuelle moyenne sur 100 ans.

3 Résultats

Sont présentés dans cette partie les résultats quantitatifs du stage. Nous détaillerons d'abord ceux obtenus du traitement de l'inventaire du réseau de placettes. Ensuite, nous proposerons une modélisation de l'évolution attendue des peuplements. Celle-ci servira de base au calcul des critères d'analyse mentionnés au 2.4. A la suite de ces analyses technico-économiques, nous serons en mesure d'évaluer le projet quant au respect des critères de qualité exigés par les marchés du carbone.

Dans les paragraphes liés à la quantification du carbone (3.1 et 3.2) les volumes indiqués s'entendent arbre entier. L'analyse économique (3.3) est, elle, réalisée sur la base de volumes bois fort (découpe ≥ 7 cm) arbre[3].

3.1 Résultats dendrométriques issus de l'inventaire

Nous présentons ici les résultats issus de l'analyse des données d'inventaire obtenues lors du premier cycle de mesure du réseau de placettes permanentes. L'analyse a été réalisée par site. Certaines illustrations, n'apportant pas d'information supplémentaire, ont été renvoyées en annexe (n° 5) par souci de synthèse. Nous nous contentons ici d'illustrer le propos à partir de l'exemple d'un ou deux sites et de présenter un tableau synthétique des résultats ensuite. La grande majorité des traitements a été opérée avec le logiciel R.

- **Nombre de tiges par hectare et qualité**

Pour le site de la Combe Maurel, la répartition moyenne des tiges par classe de diamètre et qualité est la suivante.

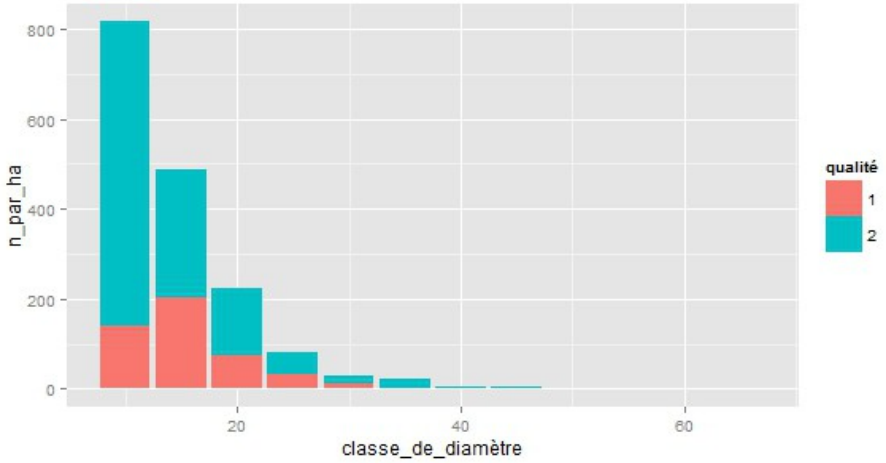


Illustration 7: Combe Maurel : répartition moyenne des tiges par qualité et diamètre. Q1 : petit sciage ; Q2 : bois de chauffage.

De ce graphe, nous pouvons déduire que le peuplement contient bien plus de 100 tiges/ha d'avenir,

3 Pour la conversion entre les deux, voir le 2.3.2

seuil permettant de conseiller un balivage dans le SRGS. Cela témoigne de la présence d'une qualité potentielle intéressante : environ 300 tiges de classes[4] 15 et + de qualité notée 1 par hectare dans ce cas. Au total, nous estimons ici le nombre de tiges de 15 et + à une moyenne de 887 tiges/ha.

Les grandeurs sylvicoles caractéristiques du peuplement sont également calculées : D_g le diamètre moyen (de l'arbre de surface terrière moyenne) et D_0 le diamètre dominant (diamètre moyen des 100 plus grosses tiges à l'hectare). Pour le calcul de D_0 nous pourrons nous référer à l'annexe n° 6 présentant le script R qui le réalise.

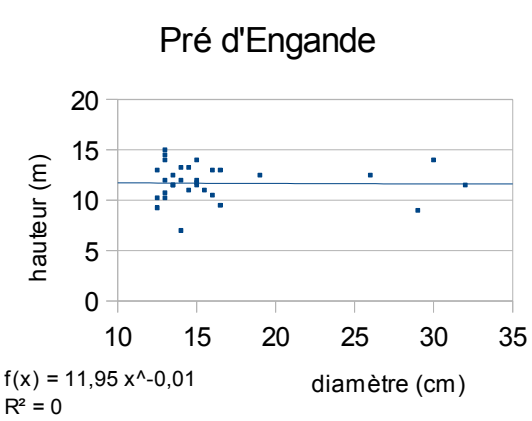
Ici, le $D_{g\ 10\ et\ +}$ calculé est de 15,8 cm. Le $D_{g\ 15\ et\ +}$ calculé est de 19,7 cm. Le diamètre dominant calculé est de 33,5 cm.

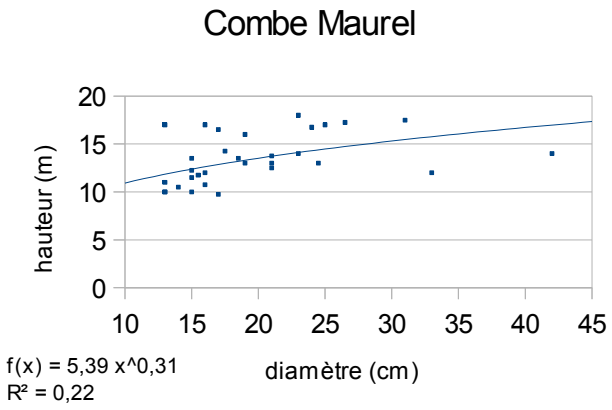
Avant intervention, le nombre total de tiges de 15 et + se situe entre 700 et 800 par hectare. Pour **le site des Antorbes où la première coupe d'éclaircie a déjà eu lieu**, le nombre de tiges moyen est alors de 378 par hectare. Les erreurs relatives, au risque statistique de 5 %, sont de l'ordre de 20 à 30 % pour cette grandeur. En bref, le balivage prélève une tige sur deux parmi les 15 et +.

- **Relations hauteur-diamètre**

Les mesures de hauteur et diamètre de trois hêtres échantillonnés à ces fins par placette offrent des relations entre les deux mesures dendrométriques. Les expliciter permet, pour chaque site, de formuler une prévision de la hauteur de chaque arbre au plus proche de la réalité sans devoir tous les mesurer. Nous obtenons un cubage relativement précis tout en épargnant en partie le coût de mesures de hauteurs.

Les résultats se répartissent selon deux modalités. Les sites des Antorbes et de la Combe Maurel montrent des relations hauteur-diamètre significatives alors que les sites du Tréboux et du Pré d'Engande illustrent une quasi-indépendance de la hauteur au diamètre. Nous ne présentons ici qu'un cas de chaque patron, le détail étant présent dans l'annexe n° 5. Chaque point représente un arbre.





Grâce à ces données, on peut modéliser la hauteur de chaque arbre inventorié nécessaire au cubage selon les formules de Vallet *et al*. Les modèles de calibration sont de type « puissance » afin de représenter le ralentissement de la croissance en hauteur avec celle du diamètre.. Un soin particulier devra donc être porté sur l'utilisation de ces relations et le **respect de leur domaine de validité** sur lequel elles ont été calibrées. En particulier, l'extrapolation à des diamètres plus gros apparaît périlleuse.

Nous pouvons aussi, puisque nous connaissons le diamètre dominant, obtenir la **hauteur dominante** qui correspond à la projection de celui-ci sur les régressions. Par exemple, pour la Combe Maurel, celle-ci est estimée à 15,8 m. Elle est de 12 m environ au Pré d'Engande. Puisqu'on connaît l'âge du peuplement, on

4 Par la suite, il est entendu par « 10 et + » que le précomptage commence à 7,5 cm à 1,30 m et par « 15 et + » un précomptage à 12,5 cm de diamètre.

peut en déduire la classe de fertilité de la station comme définie dans le GSMAS.

Ainsi, les sites de la Combe Maurel et des Antorbes témoignent d'une fertilité 2. Les deux autres d'une fertilité plus faible, entre 2 et 3 (notée ensuite « 2-3 »). Cela explique l'existence de deux « patrons » dans lesquels s'insèrent deux sites aux dynamiques semblables. Sur la stagnation constatée de la hauteur en fonction du diamètre en fertilité 2-3 nous pouvons proposer l'hypothèse d'une limitation stationnelle de la croissance en hauteur déjà atteinte.

- **Surface terrière et composition en essences**

Ici aussi nous ne présenterons que l'exemple de la Combe Maurel comme illustration. Voici donc la répartition pour ce site de la surface terrière (m²/ha) par classes de diamètre et essences. Pour la codification des essences, se référer à l'annexe nº 5.

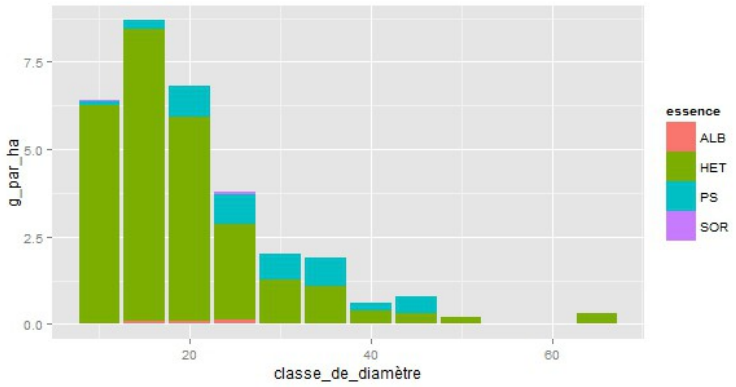


Illustration 8: Combe Maurel : surface terrière par diamètre et essence

La surface terrière moyenne est ici de 31,5 m²/ha (classes 10 et +). La part du hêtre est supérieure à 80% quel que soit le site. Le reste se répartit principalement entre pin sylvestre, sapin pectiné, alisier blanc et érable sycomore.

Les surfaces terrières avant coupe sont comprises entre environ 27 et 32 m²/ha. Aux Antorbes – 3 ans après coupe – elle est proche de 14 m²/ha.

Connaissant les âges (à ± 5 ans, *cf.* 2.1.1), on estime l'accroissement moyen en surface terrière à 0,4 – 0,5 m²/ha/an.

Les erreurs relatives, toujours au risque statistique de 5 %, obtenues pour la surface terrière des 10 et +, **varient de 13 à 22 % selon les sites ce qui est satisfaisant** par rapport au coût limité des mesures (et donc du faible nombre de placettes). Les coefficients de variation sont, eux, compris entre 18 et 31 %.

- **Tonnes d'équivalent CO_2**

A partir des données obtenues, nous cubons chaque arbre inventorié à l'aide des formules de Vallet et al. et en fonction de l'essence (*cf.* 2.3.3). Nous avons alors le volume total par hectare. Celui-ci est converti en tonnes de matière sèche puis en tonnes de carbone et, enfin en tonnes d'équivalent CO_2 (*cf.* 2.3.2). Nous ajoutons ici la « biomasse » contenue dans le bois mort sur pied, ignorée jusque là. Nous présentons ici les résultats directement en tCO_2 dans le cas de la Combe Maurel.

Ici, la biomasse aérienne représente 275 tCO_2/ha. Elle est d'environ 200 tCO_2/ha pour les sites en fertilité 2-3. Aux Antorbes on l'estime à 126 tCO_2/ha.

Précisons que l'erreur statistique autour de ces moyenne est comprise

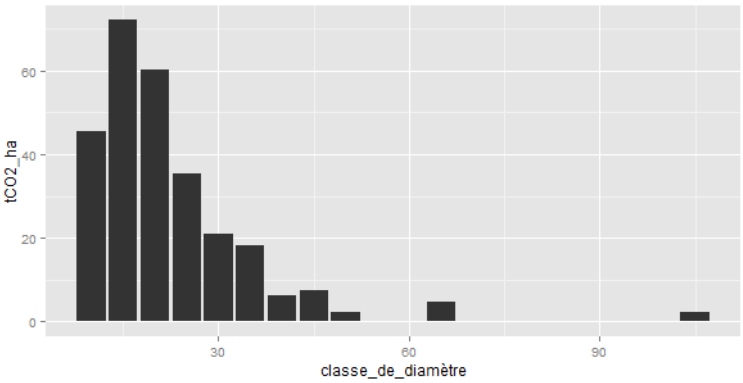


Illustration 9: Combe Maurel : tonnes équivalent CO_2 par hectare

entre 14 et 24 %. Nous pouvons nous attendre à une incertitude supplémentaire dissimulée dans les étapes de calculs intermédiaires (modélisation de la hauteur, cubage, *etc*). En supposant que le matériel sur pied aux Antorbes était équivalent à celui de la Combe Maurel avant coupe – puisque dans une même fertilité – nous retrouvons tout de même un prélèvement de l'ordre de 50 %.

- **Synthèse pour chaque site**

Le tableau ci-dessous synthétise l'ensemble des résultats quantitatifs. Lorsque cela est possible, la donnée présentée est la moyenne à l'échelle du dispositif suivie de l'erreur relative statistique en %. Au risque statistique de 5 %, les bornes obtenues par ± *er* % donnent donc l'intervalle de confiance à 95 % de la grandeur présentée. Cette incertitude est uniquement liée à l'hétérogénéité du peuplement dans le dispositif et n'inclut pas des sources d'erreur inhérentes aux calculs intermédiaires (hauteurs, cubages, *etc*) comme on l'a dit précédemment.

La conversion entre les deux dernières lignes n'est pas constante car elle dépend essentiellement de la part de résineux dans les peuplements.

site	Antorbes (déjà balivé)	Combe Maurel	Pré d'Engande	Tréboux
Nombre de placettes	13	10	10	10
G 10 et + (m^2/ha)	13,7 (±14 %)	31,5 (±18 %)	31,7 (±13 %)	26,7 (±22 %)
N 15 et + (tige/ha)	378 (±21 %)	887 (±29 %)	709 (±33 %)	737 (±30 %)
D_g 10 et + (cm)	16,3	15,8	11,5	13
D_g 15 et + (cm)	19,7	19,7	15,5	17
D_0 (cm)	27,5	33,5	21,8	24,3
H_0 estimée (m)	15,8	15,8	11,8	12
Âge estimé en 2014 (ans)	74	62	63	62
Fertilité (GSMAS)	2	2	2-3	2-3
Volume total aérien Vallet (m^3/ha)*	127 (±19 %)	290 (±19 %)	245 (±14 %)	195 (±23 %)
Tonnes de CO_2 aérien (tCO_2/ha)*	126 (±19 %)	275 (±20 %)	245 (±14 %)	186 (±24 %)

** : dont bois mort*

Ce sont ces résultats qui, nous allons le voir, sont utilisés afin de calibrer un modèle de croissance.

3.2 Modélisation de l'évolution des peuplements et bénéfice(s) carbone associé(s)

3.2.1 Élaboration de modèles de croissance

Afin de scénariser au mieux l'évolution de la quantité de biomasse aérienne à l'avenir, nous avons besoin d'un modèle de croissance des peuplements. A l'heure actuelle, le cas qui nous occupe de taillis de hêtres en limite de leur aire de répartition n'a, *a priori*, pas fait l'objet d'une modélisation de croissance. La plateforme CAPSIS n'accueille aucun modèle du genre. Ce paragraphe est donc dédié à l'élaboration d'un

modèle calibré sur les données à notre disposition pour ce cas. Ces données proviennent de deux sources : les résultats expérimentaux du dispositif en forêt domaniale du Défens sur la même commune suivi par l'ONF (Ladier, 2014) et l'analyse des résultats apportés par le dispositif de placettes permanentes que j'ai installé.

La donnée majeure issue des placettes permanentes est l'accroissement moyen constaté à 62 ans environ. En effet, possédant une estimation du volume sur pied actuel et de l'âge du peuplement (cf. 2.1.1), le rapport des deux nous fournit immédiatement la donnée. Le modèle le plus simple qu'on pourrait alors mettre en œuvre est que l'accroissement courant est constant, égal à l'accroissement moyen. Celui-ci est en mesure de reproduire l'information constatée mais décrit mal l'évolution de l'accroissement au cours du temps : nous savons bien qu'après une coupe l'accroissement courant est dégradé durant un certain temps du fait que le couvert n'est plus complet après la perturbation et surtout qu'il peut varier en fonction du temps.

Par conséquent, le modèle de croissance utilisé est un *modèle de croissance logistique*. Il suppose notamment l'existence d'une capacité d'accueil du milieu au-delà de laquelle la quantité de biomasse aérienne (et donc le volume) ne peut croître. Ce niveau atteint, la dynamique est alors régie par la concurrence naturelle et la mortalité qu'elle entraîne. C'est d'ailleurs un concept utilisé pour la définition d'indices sylvicoles caractérisant la concurrence (ex. : indice de densité de Reineke). D'après Mathieu Fortin (communication personnelle) l'utilisation de tels modèles est valable pour des peuplements équiennes donc, *a priori*, pour le traitement en taillis simple. Il est plus problématique pour une structure potentiellement non équienne qui pourrait résulter du balivage.

L'équation différentielle régissant, dans ce cadre l'accroissement en volume est la suivante :

$$\frac{dV}{dt} = r\ V\left(1 - \frac{V}{K}\right)$$

Avec V le volume total aérien (en m^3/ha), r le taux d'accroissement de celui-ci (dans l'hypothèse d'une croissance sans limite de type Malthusienne) et K la capacité d'accueil.

Si l'on résout celle-ci, la forme analytique de V en fonction du temps est du type :

$$V = \frac{1}{\alpha\ e^{-r\,t} + \frac{1}{K}} + \beta$$

La résolution introduit le paramètre α. β a été ajouté à mon initiative afin de pouvoir fixer l'ordonnée à l'origine. Cette famille de fonctions produit des courbes de croissance sigmoïdes plus à même de décrire un temps de réaction après perturbation et un ralentissement de l'accroissement lorsque le peuplement est trop capitalisé. A noter qu'elle tend alors vers (K+β).

Afin d'obtenir les courbes de croissance désirées, il nous reste à déterminer la valeur des quatre paramètres introduits. Par essai-erreur, nous faisons correspondre une courbe avec les observations de calibrage suivantes :

- L'accroissement moyen constaté à 62 ans est de 4,6 m^3/ha/an en fertilité 2 et de 3,5 m^3/ha/an en fertilité 2-3.
- D'après Ladier (2014), la modalité témoin du dispositif ONF n'a pas subi d'intervention et sa surface terrière est restée constante durant les 15 ans de suivi autour de 44 m²/ha. Nous en déduisons qu'à plus de 80 ans sans coupe, la capacité d'accueil (K+β) est quasi atteinte. En supposant que le dispositif soit aussi en fertilité 2, nous la fixons à 400 m^3/ha pour celle-ci en utilisant un coefficient f.H constaté de 9 m. Nous la fixons à 300 m^3/ha pour la fertilité 2-3 (f.H de 7,5 m du fait d'une hauteur plus faible).

- L'ordonnée à l'origine est fixée à 1 m^3/ha après la coupe rase de taillis et à respectivement 108 et 97 m^3/ha en fertilités 2 et 2-3 après coupe de balivage. Cela correspond à des prélèvements de l'ordre de 50-60 % au premier passage.
- Pour les réactions après coupe, nous souhaitons que le modèle reproduise les dynamiques suivantes :
  - Après la coupe rase de taillis, en fertilité 2, le volume à l'hectare 7 ans après est de l'ordre de 10 m^3/ha. Ce volume a été mesuré par inventaire en plein d'une partie de la coupe rase voisine afin de mieux calibrer cette phase qui pose souvent problème en modélisation (Fortin, 2014). Il est légèrement inférieur en fertilité 2-3 : on suppose que les contraintes stationnelles plus fortes ralentissent la réaction.
  - Après le premier balivage, nous conservons 60 % de l'accroissement courant avant coupe. L'éclaircie ne conserve que 45-50 % du peuplement mais, puisque nous conservons les arbres les plus vigoureux, nous supposons que nous conservons une plus grande part de l'accroissement courant. Par ailleurs, les arbres font preuve d'une réaction significative puisque, sur le dispositif ONF, après coupe, les arbres réservés s'accroissent deux fois plus vite en diamètre que dans la situation témoin (sans intervention).

Voici le récapitulatif des valeurs choisies comme décrivant au mieux ces informations.

	Fertilité 2		Fertilité 2-3	
	Taillis simple	Après balivage	Taillis simple	Après balivage
α	0,045	0,011	0,05	0,02
r	0,063	0,048	0,061	0,063
K	420	365	318	245
β	-20	35	-18	55

Nous obtenons le modèle représenté ci-dessous pour le taillis en fertilité 2.

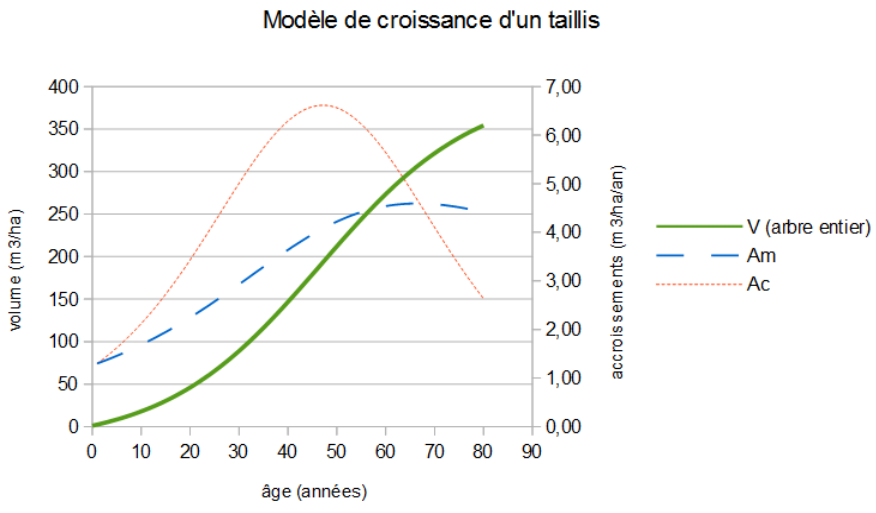


Illustration 10: Modèle de croissance paramétré pour le taillis simple de hêtre en fertilité 2

A titre d'information, je ne suis pas parvenu à décrire correctement l'effet de la fertilité. Mathieu Fortin m'a précisé que l'atteinte du maximum d'accroissement est habituellement retardée quand la fertilité diminue et que son niveau absolu est plus faible. C'est le premier effet qui est mal représenté car les courbes

représentent des maxima synchrones à 65 ans. Néanmoins, compte tenu des incertitudes sur les informations de calibrage et la largeur importante des plages de quasi-maximum (90 % du maximum atteint), nous acceptons ce dysfonctionnement.

3.2.2 Utilisation des modèles et calcul des bénéfices carbone

Après avoir élaboré et calibré des modèles de croissance décrivant la dynamique constatée localement, nous les mettons en œuvre afin de scénariser l'évolution future de la biomasse aérienne selon l'itinéraire sylvicole. Nous caractériserons aussi le prélèvement de chaque passage en coupe.

Nous présenterons d'abord graphiquement les prévisions sur 100 ans des stocks de carbone de la biomasse aérienne (en équivalent tCO_2/ha), le bilan des flux annuels et l'évolution de l'écart instantané entre les deux modalités. Nous terminerons ce paragraphe par un tableau de synthèse des bénéfices carbone (2.4.2) attendus du choix du balivage. Pour l'échéancier des coupes, se référer au 2.1. Les prévisions présentées ici concernent la fertilité 2. Ceux relatifs à la classe 2-3 sont en annexe n° 7.

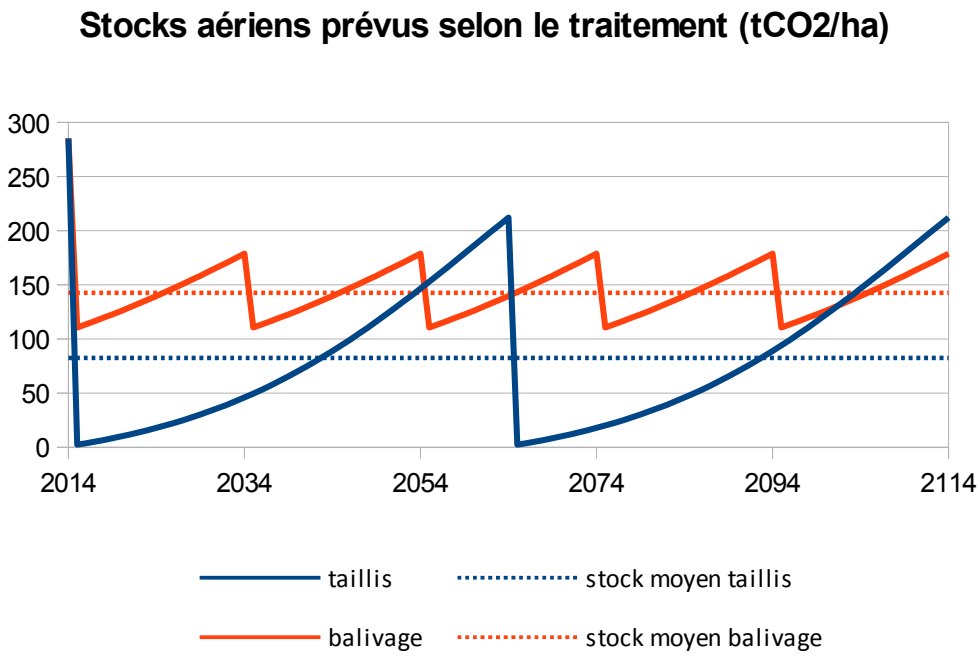


Illustration 11: Évolution des stocks sur pied modélisée sur 100 ans (F2)

Sont reportés en pointillés les stocks moyens (aire sous la courbe) au cours de chaque motif périodique. La différence entre les deux forme la fraction aérienne du *bénéfice potentiel d'atténuation*. Il prend ici une valeur de **60 tCO_2/ha**. Il en résulte la conservation, sur la durée d'analyse, d'un stock plus important même si, par moments, le scénario de taillis surpasse la futaie.

Le stock moyen autour duquel oscillerait la futaie après conversion correspond à une surface terrière de l'ordre de 16 m²/ha. La surface terrière après coupe serait proche de 12 m²/ha.

La figure ci-dessous présente les flux à l'origine des variations de stocks attendues. Ce sont ces flux qui servent de base au calcul du BASI « Carbone ». Les flux positifs correspondent à l'accroissement courant. Les négatifs aux déstockages réalisés par les coupes. La somme actualisée de ces flux à l'infini forme le BASI « Carbone ».

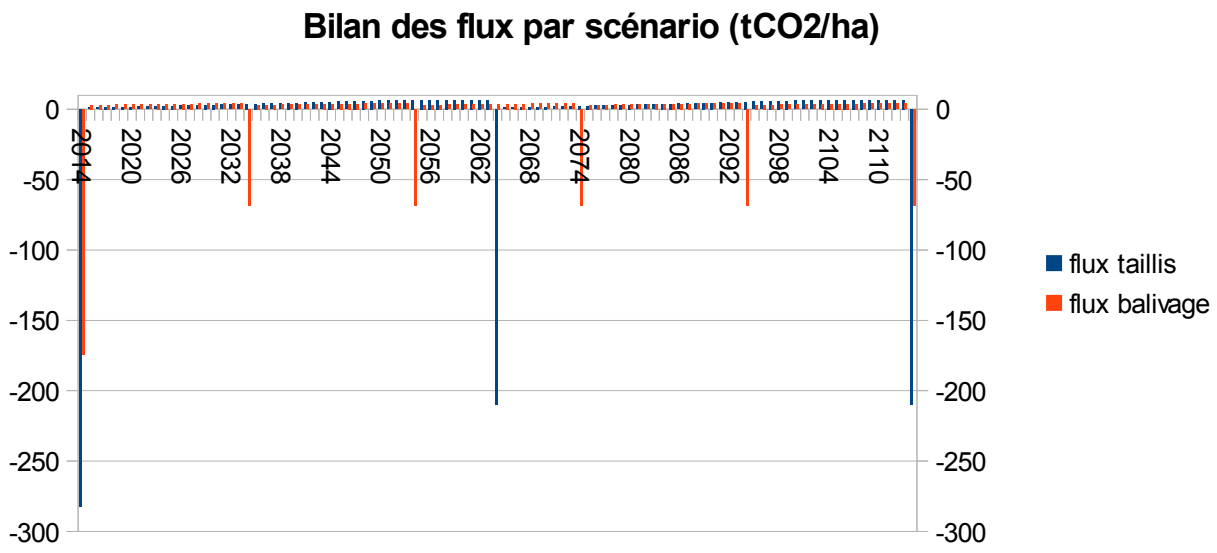


Illustration 12: Échéancier des flux attendus de biomasse aérienne sur 100 ans (F2)

La graphe suivant représente l'écart attendu chaque année entre les deux scénarios. Il sert de base aux montages de type « arrêté de boisement » sur la base de 1/26e ou 1/100e de ces écarts.

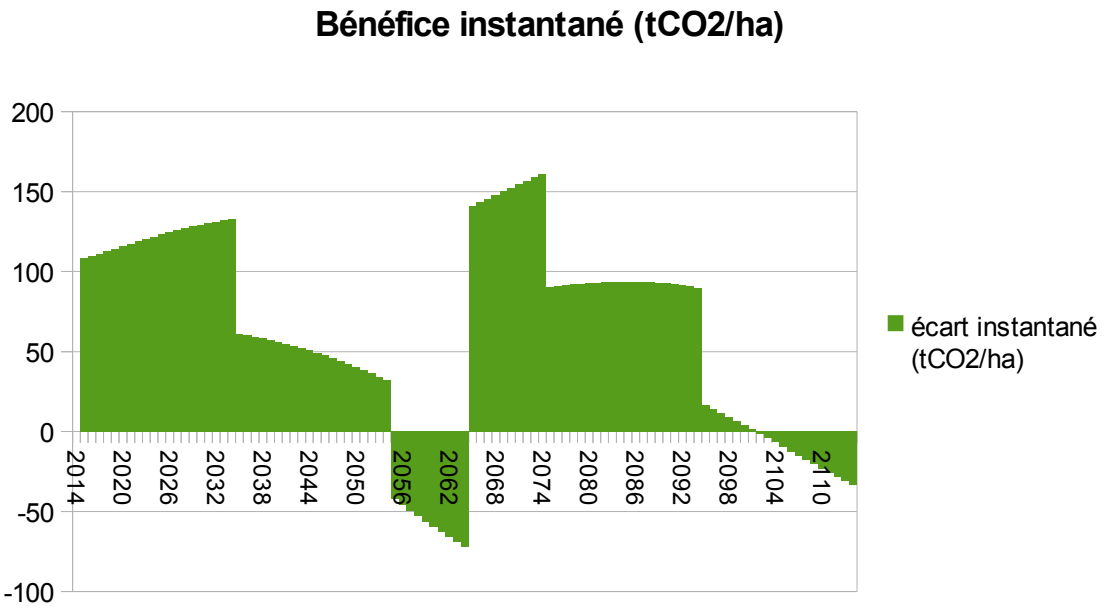


Illustration 13: Écart instantané de stock aérien (balivage – taillis en F2)

Dans le cadre d'un montage du type « arrêté de boisement du 27 décembre 2012 », les unités carbone générées chaque année équivalent à 1/26e de l'« écart » annuel. Nous envisageons aussi un coefficient de 1/100e. Pour les besoins des calculs économiques liés aux paiements du service de séquestration, nous avons considéré que les écarts négatifs conduisaient à un remboursement même si cela est complexe à mettre en œuvre.

Le tableau qui suit résume les résultats des calculs de chaque type de bénéfice en fonction du taux

d'actualisation. Ces résultats sont ceux prévus pour la classe de fertilité 2. Le cas de la fertilité 2-3 est détaillé en annexe n° 7. Nous pouvons néanmoins préciser ici que le niveau de prélèvement a été choisi dans les modèles tel que le bénéfice potentiel d'atténuation soit identique pour les deux fertilités. Ceci afin, entre autres, de ne pas complexifier le discours technique auprès d'un acheteur de services écosystémiques. Les chiffres mentionnés ne correspondent qu'à la fraction aérienne de la biomasse. Ils correspondent à des bénéfices **en tCO_2/ha**.

Taux d'actualisation	1,01 %[5]	2 %	3 %	4 %
Bénéfice Potentiel d'Atténuation	60	60	60	60
BASI « Carbone »[6]	**67**	74	79	**84**
1/26e des écarts en séquence infinie	262	144	105	**84**
1/100e des écarts en séquence infinie	**67**	38	27	22

Ce tableau suscite quelques commentaires.

Le tableau témoigne, en premier lieu, que la notion de bénéfice en terme de service de séquestration est source de multiples concepts très variables (de 22 à 262 tCO2/ha ici) mais parfois équivalents. **Dans tous les cas, le bénéfice calculé est positif : il y a donc un véritable bénéfice sur le stock de carbone en forêt à envisager une conversion du taillis vers la futaie.**

Notons que le BPA est indépendant du taux d'actualisation puisque ce concept n'utilise pas l'actualisation – ou actualise à taux nul. Sa communication reste donc objective et non entachée du choix subjectif d'un taux d'actualisation.

Le BASI « Carbone » augmente avec le taux du fait que l'écart bénéfique se situe surtout à court terme (illustration 13). Nous mettons ainsi en avant le bénéfice important et immédiat de conserver un certain volume sur pied plutôt que de réaliser une coupe rase. En cela l'utilisation du BASIC plutôt que le BPA met en évidence le fait que le bénéfice de séquestration est réalisé rapidement. Ce résultat est directement lié à la situation initiale choisie – taillis très capitalisé – qui est la situation la plus répandue sur un territoire ayant subi la même histoire de déprise agricole et de non-gestion après guerre.

Nous retrouvons bien, par construction des concepts, les équivalences aux taux critiques entre BASI et capital équivalent des montages « 1/26 » et « 1/100 » (voir 2.4.2).

Les « capitaux carbone » calculés dans les deux derniers montages diminuent avec le taux : celui-ci joue son rôle d'écrasement des flux futurs. Au vu de ce tableau, il semble préférable d'introduire une règle de saine gestion : ne pas invoquer ces concepts pour des taux inférieurs aux taux critiques – qui font leur fondement théorique. En effet, nous voyons bien, pour le « 1/26 », que l'utilisation de taux inférieurs à 4 % conduit à une surévaluation disproportionnée du bénéfice par rapport aux autres concepts.

Le choix d'un de ces chiffres comme base pour la rémunération devra donc faire l'objet d'une réflexion afin de ne pas entrer dans des dérives dignes de l'écoblanchiment. C'est le BPA qui garantit cela au mieux. Mais l'utilisation de formes issues de l'actualisation peut avoir sa légitimité.

5 Ce taux est arrondi, la valeur exacte est 1/99.
6 Ce BASI est la différence entre le BASI des flux engendrés par l'itinéraire de balivage et celui du taillis.

Jusque là, nous avons uniquement évoqué la biomasse aérienne. Or, **la composante racinaire** est non négligeable dans la biomasse constituant un peuplement forestier. Nous avons vu dans le 2.3.1 les problèmes que pose la prise en compte de ce compartiment dans le cadre de ce projet notamment par rapport à la survie ou non des systèmes racinaires après coupe. Comme il est impossible de prévoir ces réactions et que le biais par rapport à la réalité est difficile à anticiper, nous pourrons, au choix :

- Exclure ce compartiment de l'analyse en supposant que la survie des systèmes racinaires est équivalent pour une coupe de taillis ou de balivage (qui conserve des brins par cépée) et donc qu'il n'a pas d'effet sur le bénéfice
- L'intégrer en considérant un effet global lié à une proportionnalité plus ou moins conservée entre biomasse aérienne et racinaire au cours de la vie du peuplement. Auquel cas, nous appliquerons directement le coefficient d'expansion racinaire des feuillus au bénéfice de stock aérien en le multipliant par 1,28. Le BPA sera alors augmenté de 17 tCO_2/ha.

Concernant les *effets de substitution*, ils sont de l'ordre de 1,8 tCO_2/ha/an en moyenne sur un échéancier de 100 ans et quel que soit l'itinéraire choisi. L'écart entre les deux est minime car, *de facto*, et même sur 100 ans, le taillis conduit à récolter plus de volume et la part globale de qualité « bois d'œuvre » est plutôt limitée. Ce critère est donc jugé indifférent aux scénarios et de toute façon l'ordre de grandeur de la différence entre scénarios est négligeable par rapport au stock de biomasse. De plus, rappelons que son évaluation n'est réalisée qu'à titre informatif puisque cette notion pose des problèmes de double compte.

3.3 Rentabilité comparée des itinéraires

Ce paragraphe traite de l'évaluation économique de chaque scénario sylvicole. L'étude de leur rentabilité est d'ailleurs un enjeu de la caractérisation de l'apport additionnel du projet carbone. Si le scénario le plus performant pour la séquestration est aussi le plus rentable, il n'est nul besoin d'incitation financière pour le propriétaire et le projet n'est pas additionnel.

Les résultats présentés sont relatifs à la classe de fertilité 2. Nous avons considéré que les volumes récoltés sont des volumes bois-fort arbre soit 80 % du volume total de chaque arbre (Vallet *et al.*, 2006).

Voici la scénarisation détaillée des revenus bois bruts par hectare du taillis simple :

année	Volume sur pied avant coupe (m^3/ha)	Volume récolté (m^3/ha)	Revenu brut (€/ha)
2014	223	223	2 902
2064	169	169	2 197
2114	169	169	2 197

Le BASI, dans le cas du taillis vaut (supposons qu'il n'y a pas de frais de gestion ou qu'ils sont négligeables) :

$$BASI_{taillis} = 2\,902 + \frac{2\,197}{(1+r)^{50}-1}$$

Pour le cas du balivage, l'échéancier selon les trois scénarios de prix du bois d'œuvre (*cf.* 2.3.4) est le suivant :

année	avant coupe (m^3/ha)	récolté (m^3/ha)	après coupe (m^3/ha)	% BO dans la récolte	Revenu brut par scénario de prix (€/ha)		
					pessimiste	réaliste	optimiste
2014	223	135	88	0	1 758	1 758	1 758
2034	145	57	88	5	741	764	788
2054	145	57	88	10	744	790	835
2074	145	57	88	20	750	841	932
2094	145	57	88	25	753	866	980
2114	145	57	88	25	753	866	980

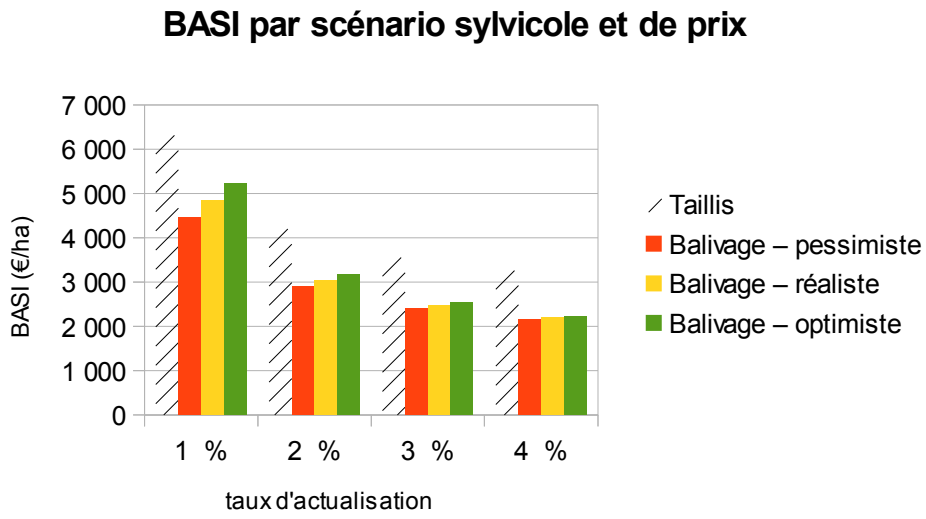
Pour le calcul du BASI du balivage, nous retirons les frais de gestion de 125 €/ha tous les 20 ans soit en séquence infinie :

$$capital\ de\ gestion\ = -125 - \frac{125}{(1+r)^{20}-1}$$

Résumons les BASI (en €/ha) :

Taux d'actualisation	Taillis	Conversion vers la futaie		
		pessimiste	réaliste	optimiste
1 %	6310	4 466	4 849	5 233
2 %	4 200	2 912	3 047	3 181
3 %	3 551	2 402	2 468	2 533
4 %	3 261	2 152	2 190	2 227

Ce qui donne la représentation graphique suivante :



Nous pouvons tirer plusieurs enseignements de ces analyses.

Le premier, c'est que le report des revenus occasionné par la conversion n'est pas compensé par

l'augmentation de leur fréquence ni par l'augmentation du prix des bois. En somme, le manque à gagner à très court terme de ne pas faire une coupe rase dans un peuplement mûr grève trop fortement le scénario économique. À cela s'ajoutent les frais de gestion supplémentaires. Nous en concluons qu'**un propriétaire, presque indépendamment de ses exigences de rentabilité** et agissant conformément à la rationalité économique uniquement **a intérêt à choisir la coupe rase**.

D'ailleurs, malgré les incertitudes pesant sur tous les calculs, nous pouvons conclure que le manque à gagner induit par le balivage est significatif. Il est de l'ordre de **1 100 €/ha** (en € 2014) quasi indifféremment du taux d'actualisation. Remarquons aussi que, pour les taux relativement élevés, l'hypothèse de prix du bois d'œuvre n'a que peu d'influence sur le résultat. Ce qui permet de s'affranchir théoriquement des hypothèses de destination de ces bois. Le modèle mis en œuvre produit un manque à gagner inférieur dans une fertilité plus faible (2-3) variant de 600 à 900 €/ha lorsque le taux d'actualisation passe de 1 % à 4 %.

Néanmoins, cette analyse ne prend en compte que les revenus du bois et pas la valeur accordée aux co-bénéfices associés au régime de la futaie (*cf*. 3.4.3 et 4.1).

3.4 Bilan au regard des critères de qualité exigés pour les projets carbone

Nous sommes à présent en mesure d'évaluer le projet au regard des critères de qualité exigés par les marchés du carbone. C'est le propos de ce paragraphe.

3.4.1 Additionnalité

Le point 3.2 nous permet de dire que le balivage des taillis de hêtre du Tréboux constitue un réel supplément de service de séquestration du carbone. La composante bénéfique est, ici, très fortement issue de la conservation d'un volume sur pied plus important. Les effets sur le stocks des produits bois et de substitution sont négligeables.

Au cours de l'analyse économique du 3.3, nous avons montré qu'il n'est pas rentable de choisir cette option sylvicole qui constitue un manque à gagner important du strict point de vue financier. Ceci du fait du report des revenus et des frais additionnels de gestion. Un paiement volontaire pour service écosystémique serait donc un levier essentiel d'incitation des propriétaires à convertir leurs taillis. En cela, le projet revêt un véritable caractère additionnel.

3.4.2 Permanence et risques de fuites

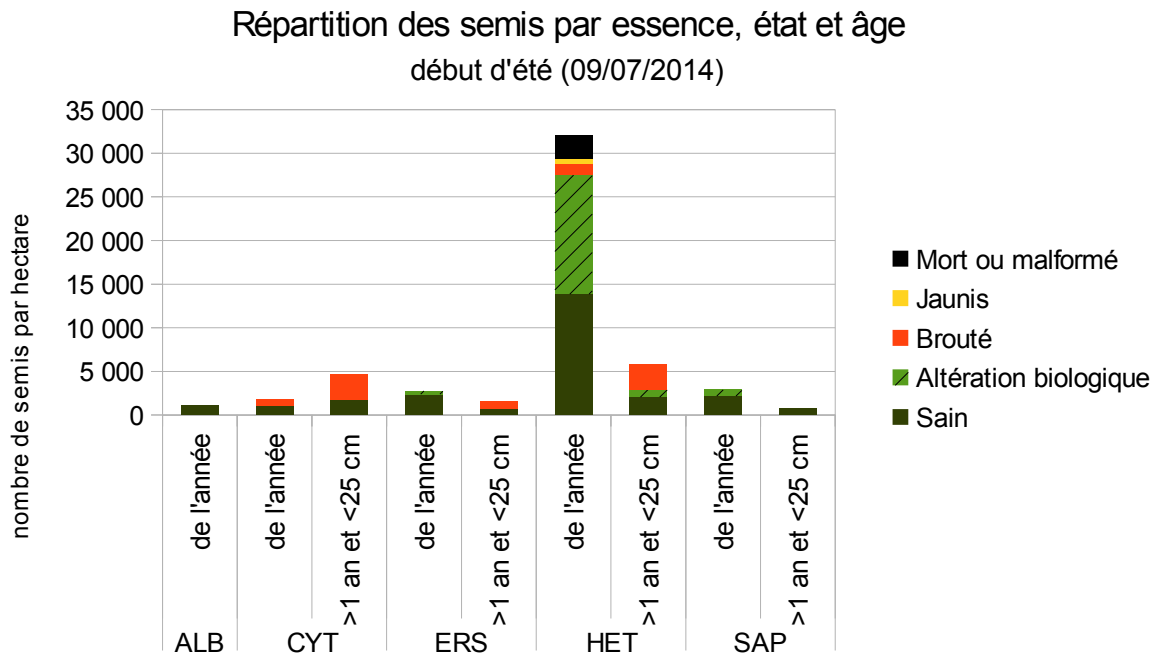
Analysons ici les facteurs pouvant influencer la permanence des émissions de dioxyde de carbone évitées par le projet et les sources de fuites possibles.

A moyen terme, c'est le plan simple de gestion (PSG) concerté qui garantit le mieux la permanence. En effet, sa portée juridique est un cadre fort pour les caractéristiques des coupes autorisées. Dans le cas de l'ASL du Tréboux, le PSG prévoit uniquement des coupes de balivage dans les peuplements de taillis bienvenants.

Les risques de fuites liées au projet – par exemple devoir raser des surfaces extérieures au périmètre pour compenser l'immobilisation temporaire de bois énergie – sont limités. La demande en bois-bûche de hêtre est relativement stable. Les éventuelles spéculations induites par l'installation de centrales industrielles à biomasse concernent plutôt la ressource résineuse. La bûche est une meilleure valorisation économique, au moins pour l'instant, que la plaquette et elle est destinée à un marché relativement mature de chauffage domestique. Pour preuve qu'il n'y a pas encore de réelle tension sur ce marché, les coupes prévues dans le PSG ont pris un retard conséquent.

Le risque incendie est une question incontournable dans un contexte méditerranéen. Si une parcelle était incendiée, le bénéfice carbone associé serait inévitablement réémis. Dans le cas de l'ASL du Tréboux, nous pouvons avancer que ce risque est plutôt faible. D'une part, les essences feuillues sont connues pour être moins inflammables que les résineux. D'autre part, la gestion préconisée conduit à une éclaircie des peuplements qui réduit la masse combustible et est susceptible de ralentir la propagation. Enfin, à l'échelle du massif, le risque a été très fortement réduit ces dernières années de par la reconquête pastorale qui a ouvert de larges pâtures qui sont de réels coupe-feu et l'ASL a porté la maîtrise d'ouvrage d'une réserve d'eau DFCI (défense de la forêt contre les incendies) alimentée par la source de Font Martine qui est un des très rares points d'eau du massif de Lure. Le risque qui en résulte est donc maîtrisé par les multiples actions de gestion concertée de l'ASL.

Enfin, plusieurs questions restent en suspens quant à la durabilité à long terme du traitement alternatif proposé. La première concerne la régénération. L'absence visuelle, actuelle, d'une régénération naturelle fournie interroge quant à la possibilité de s'appuyer sur une remontée de celui-ci comme base d'une régénération progressive. Plusieurs forestiers locaux émettent des doutes importants quant à la capacité technique de régénérer le hêtre par semis en versant sud de Lure. Nous sommes, en tous cas, en mesure d'affirmer que les hêtres fructifient de façon importante : sur l'ensemble des 43 placettes, au printemps 2014, 75 % d'entre elles étaient notée comme portant un couvert de semis de l'année supérieur à 10 %. Puisqu'aucune étude n'a été menée sur l'influence du couvert sur la régénération, il est difficile d'anticiper l'avenir de ces semis. Il semble tout de même, compte tenu des exigences d'ombre et de fraîcheur du hêtre, qu'un semis sous couvert ait plus de chance de se développer qu'en pleine lumière (situation pouvant être extrêmement sèche en été). Afin d'appréhender cette question nous avons développé un protocole simple de mesure et de suivi de la régénération (annexe n° 2). Il vise à déterminer la quantité de semis de l'année ou plus anciens mais plus petits que 25 cm de haut et leur état de santé (supposé conditionner la suite de leur développement). Sa mise en œuvre, succincte faute de temps, sur 3 placettes des Antorbes classées comme portant des semis de l'année sur plus de 10 % produit les résultats suivants. Vu l'échantillon et la variabilité, ils sont à interpréter avec une grande prudence et ne forment certainement pas une loi universelle. Pour la codification des essences, se référer à l'annexe n° 5.



Les données ainsi récoltées témoignent, *a priori*, d'une production de semis et de leur survie plutôt importante contrairement à ce qu'on observe du peuplement (photographie ci contre). Les semis de l'année comptés sur ces placettes sont de l'ordre de 30 000 par hectare, en grande majorité de hêtre. Et une bonne partie étaient encore en bon état de santé au milieu de l'été (qui a été plutôt humide et frais). Des semis plus anciens sont aussi présents, en nombre important (5 000 par hectare de hêtre environ). Nous voyons que les semis plus anciens portent plus de marques d'abroutissement tout en n'étant pas forcément compromettant.

Illustration 14: futaie sur souches (Antorbes)

Il semble donc qu'on puisse produire sous-couvert une régénération issue de graines. Le second questionnement est induit par les changements climatiques qui pourraient remettre en question la production voire la survie du hêtre dans ce contexte à échéance de la fin de siècle. Cette question est importante puisque nous nous permettons de scénariser, sur la base de dynamiques observées dans le contexte climatique actuel voire passé, une évolution sur 100 ans. Ces formations boisées sont déjà considérées comme proches de la limite de leur aire de répartition et leur avenir sous contrainte de réchauffement pose beaucoup de questions. Nous pourrons trouver quelques éléments de réponse dans l'article de Jean Ladier *et al.* (2007). Selon lui, on observe actuellement une dynamique de colonisation forte du hêtre sous couvert d'autre essences pionnières (pins principalement) qui porte à croire que sa répartition actuelle dans les Alpes-de-Haute-Provence n'est pas en équilibre et qu'elle pourrait être plus étendue. Nous ne pouvons donc pas, par avance, « mettre une croix » sur le hêtre qui pourrait se maintenir sur les stations les plus favorables (en altitude, sur de meilleures réserves en eau, *etc*). D'ailleurs, dans le Nord-Est, les changements climatiques ont eu tendance, au XX^{e} siècle, à augmenter la productivité du hêtre (Bontemps *et al.*, 2007). Face à ces incertitudes divergentes, il semble donc préférable de s'en tenir à décrire au mieux la reproduction d'une réalité constatée. S'il s'avérait que les changements remettent fortement en cause les modèles développés ici, le réseau de placettes constitue un outil de suivi et de caractérisation important. Les incertitudes de ce type poussent aussi au calcul actuariel qui les réduit fortement et permet éventuellement de s'en affranchir. En outre, le scénario de conversion à la futaie permet un suivi sanitaire plus fréquent ainsi qu'un éventuel enrichissement d'autres essences.

La permanence n'est donc pas remise profondément en cause. Nous nous en tiendrons, comme il est d'usage, à ne retenir que 90 % du bénéfice évalué comme base valorisable du service afin d'intégrer les risques existants.

3.4.3 Co-bénéfices associés au projet

Les projets carbone exigent souvent (notamment par le biais des standards de certification) une évaluation des co-bénéfices du projet pour l'environnement et la société. Cela permet d'appréhender dans quelle mesure le projet est conforme à tous les volets du développement durable et ne conduit pas à des dégâts environnementaux ou sociaux sous prétexte de séquestrer du carbone. C'est donc l'objet de ce paragraphe. En particulier, nous montrerons que les co-bénéfices associés à ce projet sont importants et variés. Ils tiennent surtout du fait de conserver un minimum de couvert forestier sur les parcelles concernées.

Concernant l'environnement, nous pouvons supposer que la conservation de baliveaux permet un impact positif contre l'érosion des sols dans un climat où le régime de précipitation peut être torrentiel. De

Illustration 15: Trous de pics en futaie sur souche (FD du Défens)

plus, l'effet sur la diversité biologique est complexe à appréhender et dépend des échelles. Le taillis peut être considéré comme favorable par la diversité de milieux qu'il crée (ouverts / fermés). En revanche, il souffre de l'absence de maturité des peuplements. Or, il est évident que le balivage ouvre la voie vers une futaie plus mature composée de plus gros bois propices au développement d'une faune (notamment cavernicole) et d'une flore spécifiques. Et les peuplements matures sont extrêmement rares sur le massif de Lure du fait de la jeunesse globale des peuplements (*cf.* 2.1.1). Les quelques îlots plus matures (par ex. : anciens parcs à animaux) portent d'ailleurs de nombreux trous de pics, potentiels habitats de chouette de Tengmalm (voir illustration 15 en FD du Défens). Il semble donc que les surfaces de forêts matures soient limitantes dans le développement de ces espèces emblématiques et que le balivage ne peut leur être que profitable.

Un autre aspect positif est la conservation du paysage. L'éclaircie du balivage a un impact visuel très limité qui s'en tient à 5 années maximum pendant lesquelles les cloisonnements créent un paysage marqué par l'action de l'homme. L'illustration 16 témoigne bien qu'après quelques années, à la faveur de la réaction des arbres, l'effet visuel, en été, a totalement disparu. Dans un contexte très fréquenté par le tourisme de randonnée (GR de la crête de Lure) il était important pour les propriétaires de conserver la hêtraie boisée sans impacter par des coupes rases géométriques souvent perçues comme dégradantes pour le paysage. D'autant qu'une coupe rase marque longtemps le paysage (*cf.* 2.1.1, illustration 5). La conservation du couvert permet aussi de préserver le sentiment de fraîcheur, recherché par les usagers, que dégagent les peuplements de hêtre.

Illustration 16: Impact paysager limité du balivage des Antorbes (3 ans)

Si nous adoptons maintenant un regard socio-économique, les bénéfices sont aussi importants. En premier lieu, il y a un intérêt sylvo-pastoral à baliver. Les hêtraies constituent des parcelles stratégiques dans l'unité pastorale puisqu'elles offrent ombre et un peu d'alimentation en été lorsque l'herbe des prairies est grillée. C'est donc un avantage important de conserver un couvert pour le berger qui offre à son cheptel des conditions plus clémentes. Le maintien d'un peuplement plutôt clair permet aussi d'augmenter légèrement la ressource alimentaire du sous-bois qui est très limitée sous une hêtraie dense. Bien sûr l'impact du troupeau, sur la régénération en particulier, doit rester maîtrisé.

Nous pouvons aussi mettre en avant un critère, exclu de l'analyse économique, qui est la réversibilité du choix du traitement. Celle-ci est exclue par le traitement en taillis simple qui fixe l'avenir du peuplement pour une grande durée. Dans la perspective d'une transmission du patrimoine qui permette à l'héritier de récolter du bois, il y a, en ce sens, tout intérêt à baliver. Ce qui n'interdit pas de pratiquer une coupe rase ensuite (ex : besoin de trésorerie).

Enfin, l'ingénierie de ce projet peut constituer les bases d'une amélioration des connaissances et des techniques pour lesquelles peu de recul existe. Le réseau de placettes permanentes porte matériellement cette fonction. Nous pourrions aussi envisager des partenariats avec d'autres institutions pour lesquelles le réseau de placettes deviendrait la base d'autres études (pastorales, écologiques) qui pourraient être reliées aux

données dendrométriques.

Par conséquent, le projet de conversion des taillis vers la futaie est riche de co-bénéfices tant matériels qu'immatériels. Nous pourrions d'ailleurs avancer l'hypothèse, au regard de l'analyse économique menée au 3.3, que le manque à gagner induit par le balivage pourrait être une évaluation de la valeur accordée par les propriétaires à ces co-bénéfices – qui sont aussi des services écosystémiques. Une approche du consentement à payer, bien qu'inconscient, pour l'ensemble de ces services (préserver le paysage, l'atout pastoral, *etc*) pourrait alors être évaluée, dans ce contexte très local, à 1 100 €/ha. L'étude économique peut être vue, dans le cadre de l'évaluation économique des services écosystémiques, comme une quantification indirecte de la valeur de ces services fournis par la forêt et de la valeur patrimoniale qui leur est accordée. Bien sûr cette indication n'a qu'une validité très locale puisqu'elle est le fruit d'un lourd travail d'animation et de la concertation des propriétaires qui n'est pas le cas général.

4 Discussion, conclusion

Nous pouvons, à présent, considérer que le projet de conversion des taillis en futaie dans l'ASL du Tréboux pourrait faire l'objet d'une valorisation du service de réduction des émissions de dioxyde de carbone. Si les données techniques et économiques sont, par ce qui précède, renseignées de façon relativement complète, cette partie propose de discuter les incertitudes pesant sur les analyses. Nous terminerons par la comparaison de deux montages possibles ainsi que par des propositions et un avis personnel sur les suites à donner et l'opportunité générale de la démarche.

4.1 Discussion de la validité des résultats et incertitudes

Nous avons tenté, au cours de l'analyse, de maîtriser, tant que faire se peut, les incertitudes inhérentes à la prospective basée sur du vivant.

Globalement, pour ce qui est de la dendrométrie, on l'a dit, l'erreur relative sur l'estimation des surfaces terrières est de l'ordre de 20 %. C'est un résultat plutôt satisfaisant compte tenu du coût limité du dispositif de placettes. Cette marge est essentiellement liée à l'hétérogénéité du peuplement qu'on ne peut contrôler. Néanmoins, elle entache tous les calculs qui suivent. En particulier, les estimations de volumes sur pied ajoutent une incertitude dissimulée par le calcul intermédiaire issu de deux régressions (la hauteur et le volume). On peut donc s'attendre, dans les faits, à une imprécision plus importante que les seuls 20 % de l'hétérogénéité du couvert. Dans tous les cas, les analyses ne sont, *a priori*, pas biaisées. Et si elles le sont, le choix délibéré d'une hypothèse réduisant le bénéfice carbone aura été pris.

Les calculs économiques étant basés sur des hypothèses issues du traitement des données dendrométriques (production par exemple) elles sont aussi incertaines.

Il paraît clair, par conséquent, que les résultats chiffrés des calculs sont à considérer au regard de ces incertitudes. La précision apparente de ces derniers ne doit pas faire illusion et il semble préférable de les considérer comme des ordres de grandeur.

Outre les imprécisions calculatoires, s'ajoutent des questions liées à l'évolution de la structure dans le temps et à l'évolution du climat. Même si nous avons apporté quelques éléments de débat à ce sujet (*cf*. 3.4.2) on ne peut formuler de conclusion certaine.

Il existe aussi beaucoup d'inconnues quant à la valorisation possible des bois qui seront mis sur le marché. Ce questionnement est d'ailleurs un des déterminants de la réticence des propriétaires (privés comme publics) à baliver. C'est un manque de l'étude que de ne pas avoir plus questionné des cas existants de hêtraies montagnardes aux qualités proches (Pyrénées, Alpes). Cependant, les résultats économiques sont peu sensibles à cette question ce qui nuance son importance.

Enfin, on pourrait diminuer le résultat économique du taillis en y intégrant un coût de l'irréversibilité, à moyen terme, du choix sylvicole. On peut très difficilement l'estimer mais on peut supposer qu'un tel mécanisme joue un rôle si les propriétaires sont dans une optique de transmission de patrimoine.

4.2 Perspectives de contractualisation et montages possibles

4.2.1 Comparaison de deux propositions de montage

J'ai présenté de nombreuses approches du bénéfice carbone induit par le projet. Ce sont autant de conceptions – qui doivent être partagées avec un contractant – qui conduisent à de multiples montages envisageables. Pour ma part, je souhaite ici en proposer deux et discuter de leurs avantages et inconvénients.

Dans les deux cas, on suppose que le projet s'étend sur une unité de gestion de 50 ha (ordre de grandeur de celles-ci au Tréboux) à baliver, en classe de fertilité 2 afin de se référer aux résultats présentés dans le texte. Le paiement est censé compenser le manque à gagner identifié ainsi que l'ingénierie du projet. Dans les deux cas aussi, le paiement du service se fera *ex-ante*. Ceci est contraire aux préconisations du guide de l'Ademe et aux usages de la certification qui préfèrent une valorisation *ex-post* sur constatation et après contrôle d'un tiers. Cependant, il est plus opportun de profiter de la souplesse des marchés volontaires pour obtenir un paiement qui finance le projet à son démarrage et qui sera le seul qui convaincra des propriétaires de s'engager dans la démarche.

- **Paiement *ex-ante* du bénéfice potentiel d'atténuation (BPA)**

Nous estimons le BPA à 60 tCO_2/ha pour sa composante aérienne. Un projet de 50 ha mobilise donc, déduction faite de 10 % pour les risques, un bénéfice de 2 700 tCO_2. Le contractant souhaitant financer le projet dans le cadre d'une démarche vertueuse finance alors le manque à gagner (1 100 €/ha soient 55 000 €) et l'ingénierie (5 500 €, voir le 2.2) pour un total de 60 500 €. Cela revient à payer environ 1 200 €/ha. Ce montage financier conduit à un prix de 22 €/tCO_2. Ce qui est acceptable dans le cadre du marché volontaire et vu la qualité du projet. Si l'on souhaite prendre en compte la biomasse racinaire – avec toutes les limites posées par l'exercice – on ajoute 765 tCO_2 au projet (17 tonnes par hectare - 10 %) soit un prix d'environ 17,50 €/tCO_2. Ces coûts ne prennent pas en compte le coût d'un contrôle.

En contrepartie, les propriétaires s'engagent pendant une durée à déterminer (10 à 20 ans par exemple) à conserver, sur les parcelles du projet, un minimum de matériel sur pied. La contrainte technique peut porter sur le nombre de tiges (conserver plus de 400 tiges de 15 et + par hectare après coupe ± 20 % d'incertitude statistique) ou sur la surface terrière (conserver 12 m²/ha de 10 et + après coupe ± 15 % d'incertitude statistique). Les critères quantitatifs sur le nombre de tiges paraissent plus intuitifs dans ce contexte tout en étant moins précis à estimer et moins reliés au volume sur pied. Cette seule contrainte permet de s'assurer que le propriétaire s'engage dans la conversion en futaie et qu'il réalise une opération conforme à cet itinéraire dans la période d'engagement. Le second passage est à échéance trop éloignée pour être pris en compte.

Ce montage a l'avantage d'être relativement simple. Le concept du BPA semble être plus simple à

faire valoir par rapport au BASI Carbone notamment. C'est sur ce modèle que les projets existants en France ont été montés. L'avantage réside aussi dans son estimation identique selon la fertilité permettant de s'en affranchir. Son inconvénient est l'engagement sur la base d'un calcul et d'un traitement adoptés sur une très longue durée (≥ 100 ans) incompatible avec un suivi et une vérification au cours de celle-ci. La période d'engagement est donc forcément inférieure à la durée sur laquelle le bénéfice est calculé ce qui est plutôt délicat. C'est pourquoi je propose le montage qui suit afin de remédier à ces problèmes.

- **Paiement *ex-ante* de 7 années de bénéfice carbone selon un montage de type « arrêté de projets de boisement » sur la base de 1/26 du bénéfice instantané en actualisant à 4%**

Nous profitons, dans ce montage, de la possibilité offerte par l'arrêté ministériel d'une prise en compte annuelle de la valorisation. Nous pouvons ainsi réduire considérablement la période d'engagement et valoriser un bénéfice qui ne dépend pas des actions post-engagement. Puisque un versement annuel n'est pas envisageable (surtout s'il suppose un contrôle) je propose de verser *ex-ante* le montant actualisé à 4 % (inhérent au choix du 1/26) des 26^{e} de bénéfice carbone prévus sur 7 ans. Cette durée est choisie pour pouvoir être couplée à un contrôle (sur la base des mêmes clauses techniques que dans le montage précédent puisqu'on ne touche qu'à la première intervention) qui n'aura que peu de sens pour une durée inférieure vu la dynamique du système. 5 ans étant vraiment une limite basse. Au-delà de 7 ans on se confronte à la temporalité des entreprises, des collectivités, *etc*.

En fertilité 2, on s'attend à une somme actualisée sur 7 ans du 26^{e} des bénéfices correspondant à 26 tCO_2/ha pour le compartiment aérien auxquelles nous retirerons 10 %. Nous avons vu que selon ce concept, le bénéfice en séquence infinie est estimé à 84 tCO_2/ha. Les 60 500 € se rapportent alors à 75 tCO_2/ha (on retire 10 %) sur 50 ha soient 3 750 tCO_2 ce qui révèle un prix de 16 €/tCO_2/ha. En bref, le contrat portera sur 23 tCO_2/ha à un prix de 16 €/tCO_2 soient 370 €/ha ou 18 550 € pour un projet de 50 ha.

Si l'on intègre la biomasse racinaire, le bénéfice objet de rémunération est alors de 30 tCO_2/ha ce qui fait chuter le prix à près de 12,60 €/tCO_2.

Ce montage a l'avantage de reposer sur l'actualisation des flux dont nous avons vu précédemment l'intérêt qu'elle pouvait apporter (préférence pour le présent, mise en avant du bénéfice fort à court terme, *etc*). Il permet aussi d'engager les contractants sur une échéance courte qui pourra être achevée par une remesure ou un contrôle plus simple (photographie aérienne prouvant qu'il n'y a pas eu de coupe rase) qui pourrait conditionner le renouvellement du contrat sur une autre période. Il me semble qu'un engagement de ce type réduit le risque d'« écoblanchiment » puisqu'il se rapproche plus d'un paiement « au réel » sur une période où les actions seront vérifiables.

Dans tous les cas, je propose de renouveler un montage collectif ayant déjà montré son efficacité (Martel et Casset, 2014). Chaque propriétaire concerné par le projet signe une convention et délègue à l'ASL la gestion et la valorisation des services écosystémiques produits par ses parcelles. Le financeur n'a alors plus affaire aux propriétaires mais à la seule entité ASL. Ceci garantit une action collective recherchée dans le cadre de la valorisation volontaire des services écosystémiques.

On peut résumer dans le tableau ci-dessous[7] (**pour un projet de 50 ha**).

	BPA	1/26 sur 7 ans à 4 %
Bénéfice carbone valorisé (tCO_2)	2 700 (3 465)	1 150 (1 500)
Montant (€)	60 500	18 550
Prix de la tonne (€/tCO_2)	22 (17)	16 (12)
Clause technique	Conservation d'un minimum de volume sur pied après coupe de balivage	
Avantage	Concept simple Financement couvrant l'entièreté du manque à gagner *ex-ante*	Engagement court
Inconvénient	Durée de calcul > durée d'engagement	Concept complexe Paiement *ex-ante* incomplet

4.2.2 Propositions en vue d'un élargissement et d'une simplification de la démarche

Il me semble judicieux de proposer des pistes de simplification de la démarche afin de donner une plus grande envergure à celle-ci à l'avenir et qu'elle devienne éventuellement un véritable outil de politique et d'animation forestière sans devoir en passer par une mobilisation aussi lourde.

Le cas du projet ayant abouti en Isère de conversion des taillis de châtaignier par exemple, est essentiellement basé sur la littérature pour les quantifications (Martel et Casset, 2014). D'autres projets pourraient être montés sur Lure en s'inspirant de la présente étude pour les aspects quantitatifs.

La simplification extrême consisterait à reprendre directement les bilans de bénéfice par hectare moyennant la vérification de la classe de fertilité.

On peut aussi proposer de s'affranchir de l'utilisation des équations de Vallet *et al.,* un peu complexes à mettre en œuvre, au profit de tarifs Schaeffer adaptés (intermédiaire numéro 13 par exemple). On pourrait aussi reprendre le coefficient de forme de Vallet *et al.* qui avoisine 0,67 dans ces peuplements et l'appliquer à une hauteur moyenne (à mesurer). On pourrait aussi affecter directement un coefficient f.H à la surface terrière qui est une mesure peu coûteuse. On peut prendre, d'après mon analyse dendrométrique, un coefficient de 9 en fertilité 2 et de 7,5 en fertilité 2-3 afin de cuber arbre entier. Un opérateur expérimenté localement devrait pouvoir reconnaître la classe de fertilité à dire d'expert. Selon moi, ces simplifications n'entraîneraient pas d'erreur importante ou du moins elle serait comprise dans l'incertitude des calculs.

Comme ultime simplification, on pourrait convertir, pour les feuillus, 1 m^3 de bois en 1 tonne d'équivalent CO_2 directement sans engendrer un biais important. Ici le coefficient utilisé est, pour le hêtre :

$$Infradensité \cdot taux\,de\,carbone\,dans\,la\,matière\,sèche \cdot \frac{44}{12} = 0{,}58 \cdot 0{,}475 \cdot \frac{44}{12}$$
$$\approx 1{,}01 \approx 1\left(tCO_2/m^3\,de\,bois\,vert\right)$$

Ce serait donc une hypothèse conservatrice induisant un biais de 1 % sous-estimant les bénéfices carbone.

7 Les données entre parenthèses correspondent à l'intégration de la biomasse racinaire à travers le coefficient d'expansion de 1,28.

4.3 Suites à donner

Je souhaite dans ce paragraphe proposer quelques suites à donner à mon travail.

D'abord, le temps m'a manqué pour rechercher un contractant susceptible de s'engager dans la démarche et de financer un projet carbone. Il s'agit de la tâche finale à réaliser : l'entrée en discussion avec un tiers et les échanges sur les exigences de chacun devrait boucler le projet que l'on peut considérer comme abondé des données techniques et économiques de façon suffisante. Une plaquette de présentation du projet a pu être réalisée grâce à ces données synthétisées. Il s'agira d'ailleurs de cibler plus précisément une unité de gestion à passer en coupe rapidement. Il me semble, en tous cas, que le projet réunit de nombreux critères de qualité et un outil performant de suivi qu'est le réseau de placettes permanentes.

Concernant le suivi de ce réseau, j'ai déjà évoqué une durée nécessaire avant la prochaine mesure. Elle ne devra pas être inférieure à 5 ans et ne devrait pas dépasser 10 ans avec le risque de tomber en désuétude. 7 ans paraissent un bon compromis. La durée pourra être couplée à celle de l'engagement contractuel. Cette remesure apportera d'ailleurs des connaissances sur la réaction des peuplements et leur accroissement. Elle pourra être financée par l'organisme contractant s'il souhaite un contrôle et participer à l'amélioration des connaissances.

Le protocole de suivi de la régénération plus détaillé pourrait faire l'objet d'une mise en œuvre plus globale, dans l'idéal sur toutes les placettes. Il pourrait faire l'objet d'un relevé au printemps, après la germination des faines, et à l'automne avant la neige. Cela permettrait de suivre précisément au cours d'une saison de végétation le pool de semis de l'année et de déterminer les conditions de leur survie (y compris en fonction de la densité du couvert). On pourrait envisager que cette opération soit suivie par le CRPF dans le cadre des dispositifs de suivis à l'échelle régionale. Plutôt qu'une mesure annuelle, il est peut-être préférable d'en pratiquer deux (début et fin de végétation) tous les deux ans voire moins intensément selon les disponibilités. Ce suivi comblerait un manque important de connaissances sur l'effet du couvert et le maintien dans des conditions de développement optimales des semis de hêtre en versant sud de Lure voire de façon plus large.

Conclusion

En conclusion, l'intérêt de ce travail réside dans la pluridisciplinarité qu'il aura mis en pratique. D'un côté, nous avons fait appel à des techniques d'inventaire, de traitement et à la dendrométrie afin d'appréhender les flux de carbone induits par la croissance du peuplement. A quoi s'est ajoutée une analyse économique comparative. C'est l'association des deux qui permet la validation technico-économique du contenu d'un futur projet de paiement des services écosystémiques principalement basé sur la séquestration de carbone atmosphérique.

Pour finir, je me dois de transmette un avis personnel quant à la démarche dans son ensemble issu des quelques mois passés en « immersion » dans le thème du carbone forestier. Globalement la démarche porte un certain intérêt. S'il apparaît clairement un manque de maturité – de la part des forestiers et des acheteurs de carbone – quant à ce sujet, il est clair que la valorisation économique du carbone ne doit pas être vue comme une rente due aux propriétaires forestiers. En revanche, l'intégration de cette thématique dans les réflexions de gestion apparaît comme un complément pertinent à d'autres axes d'analyse (accueil du public, paysage, etc). L'additionnalité carbone pouvant entrer en synergie avec d'autres regards pour une multifonctionnalité étendue d'autant. La volonté d'accéder au paiement de ce service écosystémique étant confrontée à l'additionnalité, cela pourrait constituer un formidable levier de politique forestière dès lors qu'un développement plus large serait effectif. Néanmoins, pour l'instant, le gestionnaire forestier doit

fonctionner avec un marché extrêmement opaque dont les acteurs sont difficiles à identifier. L'offre dans le cadre d'un marché volontaire est d'autant plus complexe à créer qu'elle dépend des exigences diverses de chaque « acheteur ». C'est à la fois source d'opportunités puisque très peu encadré mais aussi potentiellement un frein à un élargissement de la démarche en rythme de croisière qui supposerait plus d'homogénéité des projets. Dans le cadre du projet présentement analysé, la principale difficulté proviendra probablement de la pédagogie nécessaire à la compréhension de l'additionnalité d'un projet de gestion forestière améliorée plus complexe à intégrer que celle, intuitive, liée à un boisement. Nous ne pouvons qu'espérer le développement de ce type de financement à l'heure où les financements publics sont de plus en plus restreints tout en veillant à la conformité vis-à-vis des critères de qualité sous peine de discréditer l'ensemble de la réflexion.

Bibliographie

Contexte forestier et sylviculture du hêtre en méditerranée

Association syndicale libre « Le Tréboux ». 2007 — *Plan simple de gestion, 2008-2017* — 89 p.

BONTEMPS (Jean-Daniel), DUPLAT (Pierre), HERVE (Jean-Christophe) et DHOTE (Jean-François). 2007 — Croissance en hauteur dominante du hêtre dans le Nord de la France : des courbes de référence qui intègrent les tendances à long terme. — Dans : *Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n° 2 « Gestion des hêtraies dans les forêts publiques françaises »* — Fontainebleau : ONF, p. 39-47.

BROCHENY (Vincent). 2014 — Sylviculture du hêtre en versant sud de la montagne de Lure. — communication personnelle le 08.04.2014.

Centre régional de la propriété forestière. Schéma régional de gestion sylvicole, fiche n° 273412 : hêtre taillis bienvenant. Disponible sur le site de l'Observatoire de la forêt méditerranéenne [consulté le 25.07.2014] : <URL : http://www.ofme.org/crpf/documents/srgs/273412.pdf>

COURDIER (Jean-Marc). 2001 — *Compte rendu d'installation de l'expérimentation. Comparaison de scenarii sylvicoles dans un taillis de hêtre de 77 ans à convertir en futaie sur souche.* — ONF — 3 p.

LADIER (Jean), DREYFUS (Philippe) et REBOUL (Daniel). 2007 — La place du hêtre en région méditerranéenne. — Dans : *Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n° 2 « Gestion des hêtraies dans les forêts publiques françaises »* — Fontainebleau : ONF, p. 105-111.

LADIER (Jean), REY (Freddy) et DREYFUS (Philippe). 2012 — *Guide des sylvicultures de montagne Alpes du Sud françaises.* — ONF, IRSTEA — 301p. Disponible sur internet [consulté le 12.08.2014] : <URL : http://www.onf.fr/lire_voir_ecouter/sommaire/editions_onf/++oid++1942/++conf++649701528/@@display_media.html?datatype:int=3>

LADIER (Jean). 2014 — *Comparaison de scenarii sylvicoles dans un taillis de hêtre. Forêt Domaniale de Lure. Compte rendu de mesure après 11 ans.* — Avignon : ONF — 6 p.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT. 2012 — *Récolte de bois et sciages en 2012 en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Agreste Provence-Alpes-Côte d'Azur* — Marseille : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt — 2 p.

TOPPAN (Éric). 2014 — Les chiffres de l'observatoire France Bois Forêt. 4e trimestre 2013 : quelle est la situation des marchés de la filière bois ? — *Forêts de France*, avril 2014, p 10-11.

VUILLERMOZ (Pierre). 2014 — Gestion des hêtraies publiques du sud de la montagne de Lure — communication personnelle le 23.07.2014.

Carbone : contexte, certification et quantification

AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE. 2012 — *La compensation volontaire. Démarche et limites.* — Ademe — 15 p.

BROTTO (Lucio). 2014 — Étude de cas : The development of an Italian Forest Carbon Code. — Dans : *Quelle certification pour les projets de compensation carbone en forêt française ?* Club Carbone

Forêt-Bois, réunion du 24.06.2014 à Paris. — 31 dia. Disponible sur internet [consulté le 12.08.2014] : <URL : http://www.etifor.com/upload/staff/editor/Brotto_PARIS_2014_Brotto-Italian Carbon Markets.ppt.pdf>

CENTRE INTERPROFESSIONNEL TECHNIQUE D'ÉTUDE DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE. 2013 — Les émissions liées à l'utilisation des terres, leurs changements et la forêt (UTCF) [en ligne]. Disponible sur internet [consulté le 12.08.2014 ; mise à jour du 02.08.2013] : <URL : http://www.citepa.org/fr/pollution-et-climat/analyse-sectorielle/foret-menu>

CENTRE INTERPROFESSIONNEL TECHNIQUE D'ÉTUDE DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE. 2014 — Dioxyde de carbone (CO2) [en ligne]. Disponible sur internet [consulté le 12.08.2014 ; mise à jour du 10.07.2014] : <URL : http://www.citepa.org/fr/pollution-et-climat/polluants/effet-de-serre/dioxyde-de-carbone>

DEHEZA (Mariana) et GRIMAULT (Julia) (Coords.). 2014a — *Dossier n° 8 du 24 juin 2014. Quelle certification pour les projets de compensation carbone en forêt française ?* — Paris : Club Carbone Forêt-Bois, CDC Climat Recherche — 118 p. [diffusion réservée aux membres du club]

DEHEZA (Mariana) et GRIMAULT (Julia) (Coords.). 2014b — *Les bases du carbone forestier v.2 ; Juin 2014.* — Paris : Club Carbone Forêt-Bois, CDC Climat Recherche — 36 p. [diffusion réservée aux membres du club]

FORÊT PRIVÉE FRANÇAISE. 2014 — Carbone et forêt : atténuer le changement climatique par la gestion forestière. Disponible sur internet [consulté le 12.08.2014] : <URL : http://www.foretpriveefrancaise.com/carbone-et-foret-427555.html>

FORTIN (Mathieu). 2014 — Utilisation de modèles de croissance logistique pour les peuplements forestiers. — communication personnelle le 10.07.2014.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT. 2007 — *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [Équipe de rédaction principale, R.K. PACHAURI, et A. REISINGER (dir.)]. — Genève : GIEC, 103 p.

INSTITUT TECHNOLOGIQUE FORÊT CELLULOSE BOIS-CONSTRUCTION AMEUBLEMENT. 2012 — *Carbone Forêt-Bois : des faits et des chiffres.* — FCBA — 27 p. Disponible sur internet [consulté le 12.08.2014] : <URL : http://www.ofme.org/documents/FiliereBois/Chiffres-Forêt-Carbone_FCBA_2012.pdf>

LETURCQ (Philippe). 2013 — L'énergie du bois est-elle neutre vis-à-vis de l'effet de serre ? — Dans : *De l'équienne à l'irrégulier : des techniques à apprivoiser. Actes du colloque sur l'irrégularisation des peuplements résineux, 28 novembre 2012, Salle académique de l'Université de Liège (Belgique) — Forêt Wallonne,* n° 123, mars-avril 2013, p 55-61.

LOUSTAU (Denis) (Coord.). 2004 — Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. — Rapport Final Projet GICC 2001 ‘‘Gestion des impacts du changement climatique’’ et Convention Gip ECOFOR no. 3/2001, Juin 2004. INRA : Bordeaux-Pierroton, 137 p.

MARTEL (Simon). 2014a — *Méthodologie spécifique pour des projets de gestion forestière améliorée de type conversion de taillis en futaie.* — CNPF/FPF — 25 p. [document de travail confidentiel]

MARTEL (Simon). 2014b — *Projets carbone et marchés volontaires, État des lieux.* — CNPF/FPF — 3 p.

MARTEL (Simon). 2014c — *Quantification : comment évaluer le bénéfice carbone d'un itinéraire sylvicole ?* — CNPF/FPF — 7 p. [document de travail confidentiel]

MARTEL (Simon) et CASSET (Loïc). 2014 — Retour d'expérience du projet de mécénat carbone de l'ASLGF du Bas-Dauphiné. — communication personnelle le 26.03.2014.

Dendrométrie, cubage

CALAMINI (Gianfranco) et GREGORI (Enrico). 2001 — Studio di una faggeta dell'Appennino Pistoiese : relazioni allometriche per la stima della biomassa epigea. — *L'Italia Forestale e Montana*, vol. LVI, nº 1, p. 1-23.

CHEVALIER (Hélène), COLIN (Antoine), HERVÉ (Jean-Christophe). 2013 — Évaluation de la représentativité des tarifs de volume total aérien par rapport à la ressource nationale : ex. du hêtre. — Dans : *Séminaire de restitution du projet ANR EMERGE* [en ligne] — Nancy : INRA, 17 diapositives. Disponible sur internet [consulté le 17.07.2014] : <URL : http://mycor.nancy.inra.fr/ARBRE/wp-content/uploads/2013/11/E3-IGN_Emerge_18septembre2013_v3.pdf>

FAO, DIBAF et CIRAD. 2013 — GlobAllomeTree : international web platform for tree allometric equations to support volume, biomass and carbon stock assessment [en ligne]. Disponible sur internet [consulté le 17.07.2014] : <URL : http://www.globallometree.org>

SANTA REGINA (Ignacio) et TARAZONA (Teresa). 2001 — Organic matter and nitrogen dynamics in a mature forest of common beech in the Sierra de la Demanda, Spain. — *Annals of Forest Science* (58), p. 301-314.

SCHAEFFER (Léon). 1949 — Tarifs rapides et tarifs lents. — *Revue Forestière Française*, nº 1, avril 1949, p. 7-13.

VALLET (Patrick), DHOTE (Jean-François), LE MOGUÉDEC (Gilles), RAVART (Michel) et PIGNARD (Gérôme). 2006 — Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. — *Forest Ecology and Management* (229), p. 98-110.

Actualisation à long terme

HARDELIN (Julien) et MARICAL (François). 2011 — Taux d'actualisation et politiques environnementales : un point sur le débat. — La Défense : Commissariat général au développement durable — *Études et Documents*, nº 42, mai 2011, 18 p.

LEBÈGUE (Daniel) (Prés.). 2005 — Révision du taux d'actualisation des investissements publics. — Paris : Commissariat général du Plan. — 112 p.

QUINET (Émile) (Prés.). 2013 — Évaluation socioéconomique des investissements publics. — Paris : Commissariat général à la stratégie et à la prospective. — 352 p.

Contacts

Vincent Brocheny

Responsable d'Unité territoriale retraité (ONF)
Chemin Chabarels
04 300 FORCALQUIER

Mathieu Fortin, Ph.D.
Ingénieur de rechercher
Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB UMR 1092)
AgroParisTech, 14 rue Girardet
54 000 NANCY

mathieu.fortin@agroparistech.fr fixe : 03.83.39.68.71

Jean Ladier
Responsable Pôle R&D
ONF – Département R&D – Pôle d'Avignon
1 175 Chemin du Lavarin
84 000 AVIGNON

jean.ladier@onf.fr fixe : 04.90.89.27.84

Simon Martel

Coordinateur programme carbone forêt-bois
CNPF / Forestiers privés de France
Parc de Crécy – 18 avenue du Général de Gaulle
69 771 SAINT DIDIER AU MONT D'OR CEDEX

simon.martel@cnpf.fr fixe : 04.72.53.60.98 portable : 06.06.72.59.72

Gilles Martinez
Chargé de mission « politiques forestières territorialisées »
CNPF délégation de Provence-Alpes-Côte-d'Azur
7 Impasse Ricard-Digne
13 004 MARSEILLE

gilles.martinez@crpf.fr portable : 06.74.64.63.57

Pierre Vuillermoz
Agent Patrimonial – ONF

pierre.vuillermoz@onf.fr portable : 06.16.43.70.21

Annexes

Table des annexes

Annexe no 1 : Protocole dendrométrique du réseau de placettes permanentes.....49
Annexe no 2 : Protocole de suivi détaillé de la régénération en contexte sylvo-pastoral.....54
Annexe no 3 : Formules de cubage.....57
Annexe no 4 : Actualisation à long terme, cadres des investissements publics.....58
Annexe no 5 : Résultats dendrométriques détaillés.....59
Annexe no 6 : Script de calcul du diamètre dominant.....62
Annexe no 7 : Scénarisation et résultats en fertilité 2-3.....63

Annexe nº 1 : Protocole dendrométrique du réseau de placettes permanentes

Protocole dispositif de placettes « carbone » - ASL du Tréboux

1 *Description du dispositif*

Le dispositif se compose de 43 placettes permanentes regroupées en quatre sites : deux de part et d'autres du col de la Roche (13 à l'Ouest, 10 à l'Est) et deux sites de 10 placettes (Nord de la combe Maurel et Pré d'Engande). La disposition des placettes correspond à un échantillonnage de 2 placettes par hectare soit une maille de 71 m. Se reporter à la carte des placettes jointe.

Les objectifs que porte ce dispositif sont :

- l'estimation du matériel sur pied au début de la période afin de calibrer les prévisions d'évolution du peuplement quant au carbone qu'il contient
- le suivi et le contrôle dans le temps du respect de l'itinéraire sylvicole (avec une influence minimale des opérateurs) et de ses effets
- apporter, après une seconde mesure, des compléments quant aux prévisions de croissance
- avoir un coût limité d'installation et surtout de suivi
- apporter des références techniques quant à la gestion et à la sylviculture de ces peuplements relativement peu étudiés

Le centre des placettes, lors de l'installation, sera matérialisé à l'aide d'un fer à béton planté dans le sol. Afin de faciliter leur remesure, la partie émergeant du sol sera peinte en bleu et les trois arbres les plus proches seront griffés d'une croix au pied et localisés en azimut et distance. Cela devrait être suffisamment discret pour limiter les biais tout en offrant un gain de temps lors de la remesure.

Les placettes, par souci de simplicité, sont à rayon fixe. Elles comportent deux cercles concentriques de rayons (dans la pente) de 9 et 18 m.

2 *Mesures sur la placette*

On chemine vers les placettes par topofils/boussole de la façon la plus précise possible.

Sur chaque placette, on relève un point GPS du centre et on mesure la pente (en vue des corrections).

Le diamètre à 1,30m des arbres vivants précomptables contenus dans la placette est mesuré, au centimètre près, queue du compas en direction du centre (pour éviter des biais liés à la forme des arbres). Lorsque un arbre a été compté, on le cercle d'un ruban provisoirement afin d'éviter des oublis ou des doubles mesures.

Les arbres de diamètre compris entre 12,5 et 22,5 cm (catégories 15 et 20) sont échantillonnés sur un rayon de 9 m. Les arbres de 22,5 cm et plus (25 et +) sont échantillonnés dans un rayon de 18 m selon un schéma concentrique. Les bois de 7,5 à 12,5 (catégorie 10) sont comptés « à l'oeil » dans le rayon de 9 m

(estimé dans ce cas) (cf. schéma).

On relève aussi l'essence de l'arbre et sa classe de qualité potentielle (hors contraintes de diamètre). Pour la **qualité**, seules deux catégories sont envisagées : potentiel petit sciage (noté 1) jugé surtout sur la rectitude et l'absence de défauts rédhibitoires sur au moins 5m (tolérance de 1 à 2 branches vivantes, éventuellement quelques gourmands) ; le reste en bois énergie (noté 2). Ceci indépendamment de la vigueur apparente de l'arbre. On souhaite ainsi suivre l'évolution de la composition du peuplement (en vue de co-bénéfices de biodiversité) et de sa qualité au regard de l'éclaircie.

Lors de l'installation, **les trois hêtres précomptables les plus proches du centre** sont localisés en azimut et distance par rapport au centre. On les griffe, en croix, au pied. En plus de la mesure de leur diamètre, on **mesure la hauteur de chacun**. La mesure de hauteur permet, dans un premier temps, d'expliciter la relation h=f(d130) et donc (i) de choisir un tarif de cubage adapté et (ii) de déterminer la classe de fertilité du peuplement (l'âge étant connu). Ces arbres pourront fournir des données d'accroissement en diamètre fonction de leur diamètre.

Seul le **bois mort sur pied** est mesuré étant donné que celui au sol n'entre pas en jeu dans la méthodologie CNPF-FPF. Les arbres morts sont mesurés selon les même modalités que les arbres vivants précomptables. D'après la méthode, on note leur catégorie de décomposition en plus du diamètre à 1,30 m :

- 1 : arbre mort avec toutes les branches
- 2 : perte des branches fines
- 3 : restent uniquement les grosses branches
- 4 : tronc seul, estimation de la hauteur à l'œil

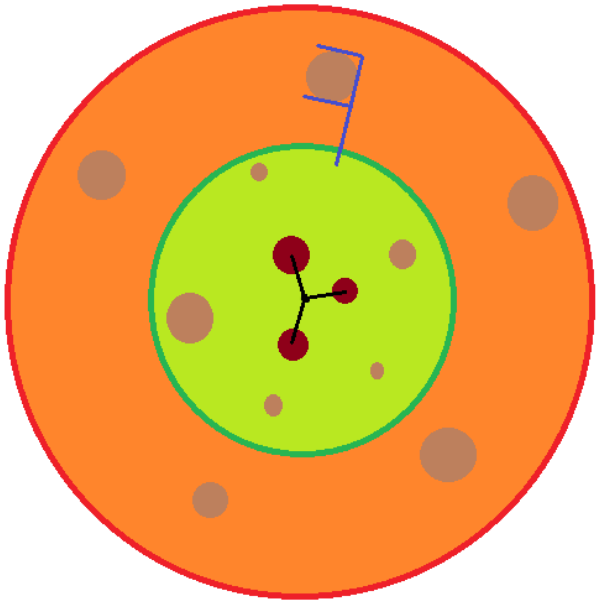
1 2 3

Enfin, **la régénération** est suivie simplement par l'observation dans les 9 m de semis de l'année germés (au printemps en particulier) recouvrant plus de 10% de la placette ainsi que par la recouvrement (par classes de 10%) de la régénération « acquise » (semis de plus de 10 cm et haut et de moins de 2,5 cm de diamètre).

Afin d'éviter des erreurs lors du traitement, voici le coefficient à mettre en œuvre pour les **corrections de pente**. Les placettes sont des disques dans le versant et deviennent, par projection, des ellipses à l'horizontale. Afin de convertir des données à l'hectare « dans la pente » à des données « à l'horizontale », **on divise** par le facteur correctif suivant :

$\cos(\arctan(\theta))$ où θ est la pente mesurée en %

Schéma d'une placette et des mesures dendrométriques à y effectuer



rayon : 9 m
Régénération (recouvrement),
d > 12,5 cm mesurés
d < 7,5 cm comptés "à l'oeil"

rayon : 18 m
d > 22,5 cm mesurés

hêtres centraux :
azimut, distance,
diamètre, hauteur

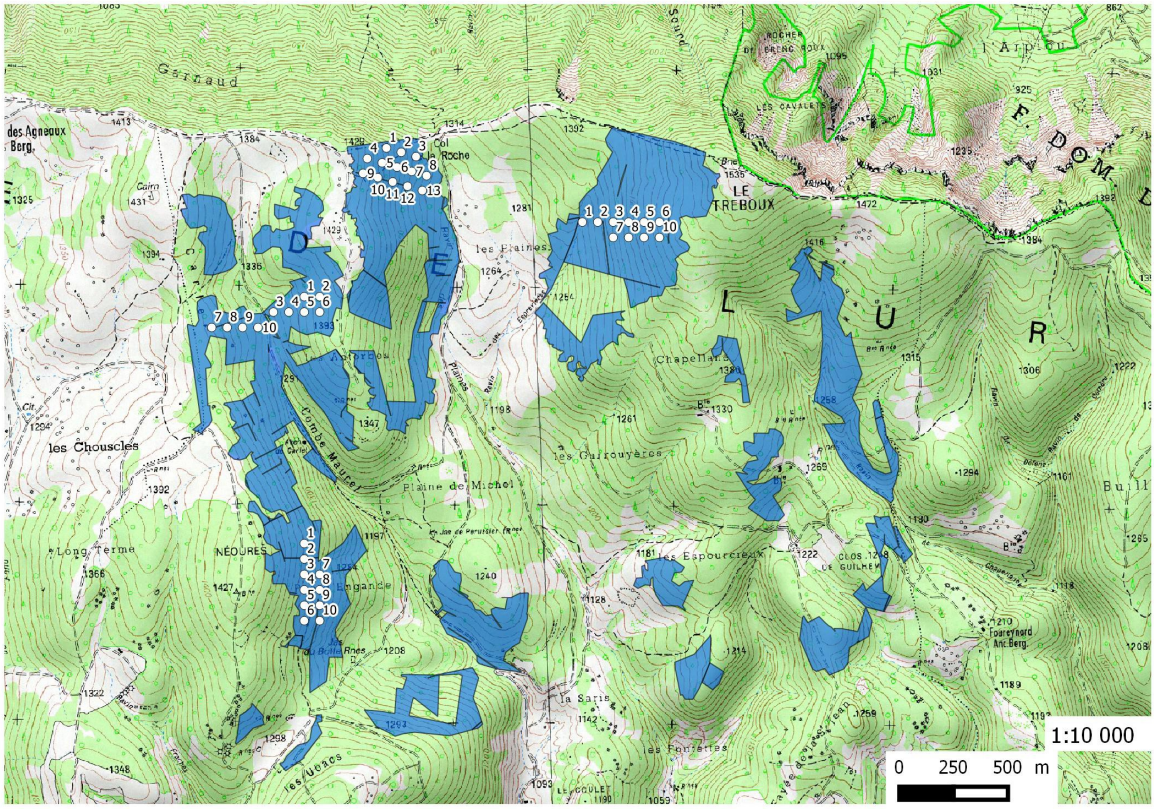
Tous les arbres sont qualifiés en essence (dont bois mort sur pied) et qualité

Exemple de notation de la qualité des billes (la hauteur de l'image représente environ 6 m de haut au premier plan) :

Bille rectiligne sur 5 m, quelques gourmands vivants (non disqualifiant) : **Qualité 1**

Bille **non** rectiligne : **Qualité 2**

Localisation prévisionnelle des placettes :



Fiche de relevé terrain, dispositif « carbone » - ASL Le Tréboux

site :	
n° placette :	
nom waypoint GPS :	

date :

opérateur(s) :

Pente (%) :	

Arbres centraux :

Num	Azimut	Distance	Diamètre	Hauteur	Qualité*	Observation

Arbres (y compris les 3) :

Essence	Diamètre	Qualité*

tiges de 10 dans les 9 m :

Essence	Qualité 1	Qualité 2

Bois mort sur pied :

Diamètre	Décomposition	hauteur si 4

Régénération :

- semis de hêtre de l'année (> 10%) (rayer) : absent / présent
- semis acquis :

Essence	Recouvrement

Observations (cheminement, etc) :

** Qualité : 1 petit sciage – 2 bois énergie*

Annexe nº 2 : Protocole de suivi détaillé de la régénération en contexte sylvo-pastoral

Ce protocole a pour objectif d'éclairer les constats – inexpliqués – de fructification et germination et le manque paradoxal de régénération acquise issue de graine. Pour se faire, il s'agit de caractériser la structure de la régénération en nombre mais aussi selon l'âge et l'état des semis. Ce dernier facteur devant servir de base à l'explication de la « volatilisation » des semis.

On souhaite compter, sur une placette à rayon fixe, entre 50 et 100 semis.

Le rayon utilisé par défaut est de 2,10 m et passe à 3,0 m si les semis comptés sont trop peu nombreux.

Il est souhaitable de réaliser un comptage avant et un après l'été.

Chaque semis fait l'objet d'une observation minutieuse visant à caractériser :

1. Son essence (hors buissons)
2. Son âge : **semis de l'année** / **semis de plus d'un an et de moins de 30 cm de hauteur**
3. Son état conditionnant la suite de son développement :
    - **sain** (aucun des défauts suivants)
    - **jaunis** (en train de sécher)
    - **altéré biologiquement** : altération par un facteur biologique (chenille, champignon) conduisant à une perte d'au moins 25% de la surface de feuilles
    - **brouté** (de façon récente ou non)
    - **mal-formé ou mort**

Si un semis peut entrer dans deux catégories il est inclus dans celle qui compromet *a priori* le plus son futur développement (ex : porte une légère trace d'abroutissement et une forte altération biologique (>80% du feuillage) => altéré biologiquement).

On compte aussi les rejets de taillis de moins de 1 m de haut sans distinction d'essence.

Suivent un modèle de fiche de relevé et des exemples de semis.

Proposé par Jonathan Pitaud le 8 juillet 2014

Relevé de régénération

placette : date : / / opérateur(s) :

rayon de la placette :

Essence	âge	Sain	Jaunis	Altéré biologiquement	Brouté	Mal-formé ou mort
	de l 'année					
	>1 an et <30 cm					
	de l 'année					
	>1 an et <30 cm					
	de l 'année					
	>1 an et <30 cm					
	de l 'année					
	>1 an et <30 cm					
taillis						

Exemples de semis de hêtre

semis de l'année, sain

semis de plus d'un an et moins de 30 cm, sain

semis de plus d'un an et moins de 30 cm, brouté

semis de l'année, altéré biologiquement

Annexe n° 3 : Formules de cubage

Tarifs Schaeffer (d'après Schaeffer, 1949) ; V en m^3, d en cm mesuré à 1,30 m, n le numéro de tarif :

- lent : $V = \frac{5 \cdot (8+n)}{90\,000} \cdot (d-5) \cdot d$
- rapide : $V = \frac{5 \cdot (8+n)}{70\,000} \cdot (d-10) \cdot (d-5)$

Tarif intermédiaire inspiré des Schaeffer :

- intermédiaire : $V = \frac{5 \cdot (8+n)}{80\,000} \cdot (d-7{,}5) \cdot (d-2{,}5)$

Équation allométrique de Santa Regina et Tarazona (2001) ; B en kg, d en cm mesuré à 1,30 m :

- Biomasse totale aérienne (feuilles comprises) : $B_{tot} = 0{,}1315 \cdot d^{2{,}4321}$
- Biomasse des feuilles : $B_f = 0{,}0145 \cdot d^{1{,}9531}$

Équation allométrique de Calamini et Gregori (2001) ; B en kg, d en cm mesuré à 1,30 m, h_{tot} hauteur totale en mètres :

- Biomasse totale aérienne (hors feuilles) : $B_{tot} = 0{,}03927 \cdot d^{2{,}01365} \cdot h_{tot}^{0{,}87832}$

Tarif volume total aérien de Vallet *et al.* (2006) ; v_{tot} en m^3, c_{130} la circonférence à 1,30 m en cm, h_{tot} hauteur totale en mètres :

- $v_{tot} = form \cdot \frac{c_{130}^2}{40\,000\,\pi} \cdot h_{tot}$
- coefficient de forme : $form(c_{130,} h_{tot}) = (\alpha + \beta \cdot c_{130} + \gamma \cdot hdn) \cdot (1 + \frac{\delta}{c_{130}^2})$
- *hardiness* : $hdn = \frac{\sqrt{c_{130}}}{h_{tot}}$

Essence	α	β	γ	δ
hêtre	0,395	0,000266	0,421	45,4
pin sylvestre	0,297	0,000318	0,384	204,0
sapin	0,550	-0,000749	0,277	/

Annexe nº 4 : Actualisation à long terme, cadres des investissements publics

L'analyse économique menée dans l'étude s'inspire des cadres d'évaluation de l'action publique résumés ici. La question de fond principale est celle de la prise en compte du très long terme sur lequel toute analyse forestière s'interroge. S'ajoutent des concepts politiques voire philosophiques liés à la prise en compte des générations futures qui sont négligées dans le calcul économique dès lors qu'on actualise. En effet, les flux lointains (disons dans plus de 100 ans) sont totalement écrasés par cette opération et sont insignifiants dans le calcul et donc dans les arbitrages qui suivent. Cette question est essentielle dans la prise en compte des enjeux environnementaux. C'est pourquoi je résume ici quelques points de cadrages issus de trois rapports cités dans la bibliographie.

Globalement, à l'heure actuelle, ce sont les recommandations du **rapport Quinet (2013)** du Commissariat au Plan qui fixent les règles de calcul économique public. On peut aussi s'inspirer du **rapport Lebègue (2005)** qui recommandait un taux d'actualisation de base (en monnaie constante et hors prime de risque) de **4 %**. Ce rapport préconise aussi, pour une plus grande prise en compte du long terme, **une diminution continue de celui-ci à partir de 30 ans jusqu'à un plancher de 2 %**, en approchant de 3 % à 100 ans.

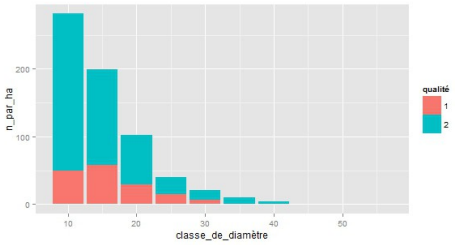
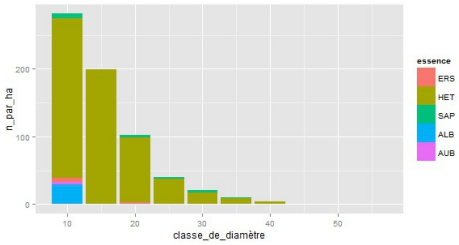
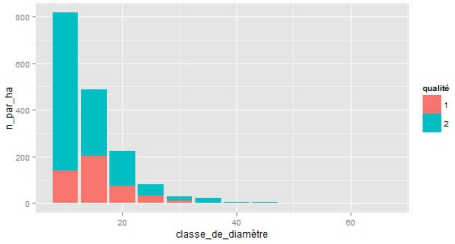
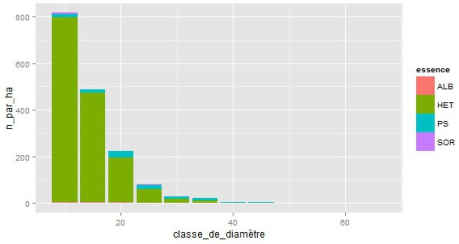
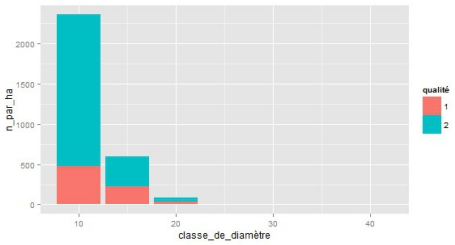
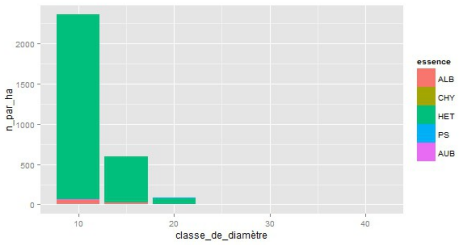
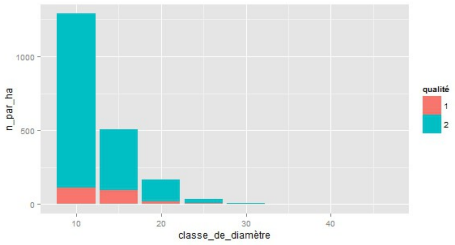
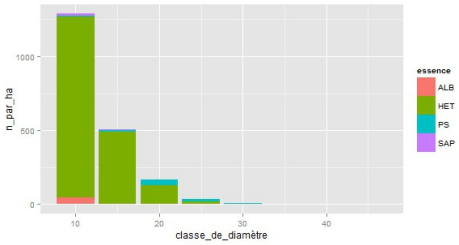
En particulier, ce rapport exclu de ne pas actualiser, y compris pour les biens environnementaux. On pourra se référer, à ce sujet, au chapitre 2.1 « Taux d'actualisation et développement durable » (pages 51 à 65). En effet, cela peut conduire à d'énormes sacrifices à court terme parfois contre-productif vis-à-vis de la solidarité intergénérationnelle.

S'il n'est pas satisfaisant de ne pas actualiser, il est en revanche préconisé d'utilisé un **système de prix relatifs**. Par exemple, on peut supposer que les populations accorderont de plus en plus de valeur aux biens et services environnementaux. Leur prix peut alors augmenter, en relatif, plus rapidement que le prix du panier moyen, donc plus rapidement que l'inflation. Cela conduit à leur affecter un taux d'augmentation du prix (en monnaie constante) tout en conservant un taux d'actualisation unique.

Ces recommandations sont reprises par le rapport de **Hardelin et Marical (2011)** qui synthétise les éléments de débat quant au lien entre actualisation et politiques environnementales. Le point 9 du premier chapitre du rapport Quinet (2013) , « La valeur du carbone » met en place un scénario d'augmentation du prix de cet élément au cours du XXIe siècle qui aurait pu servir de base à l'analyse.

Annexe nº 5 : Résultats dendrométriques détaillés

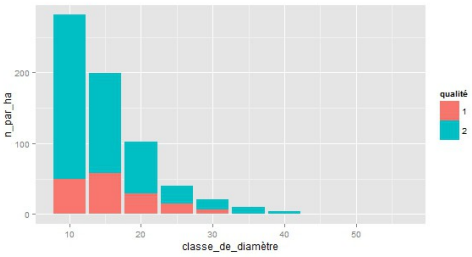
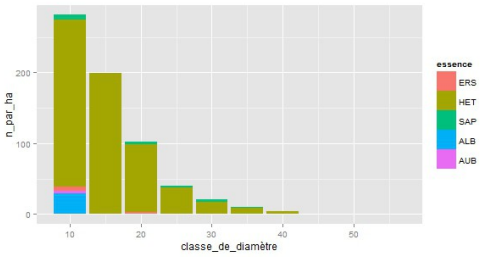
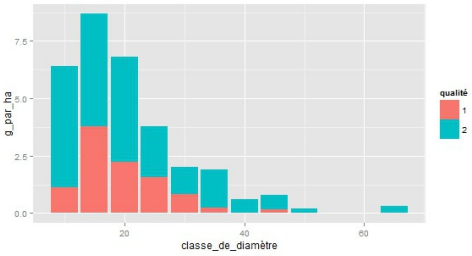
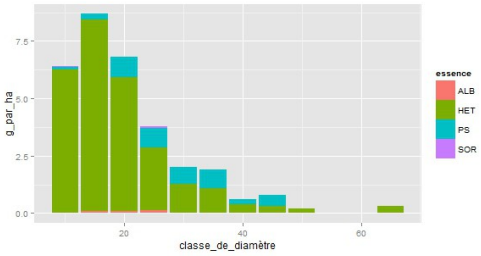
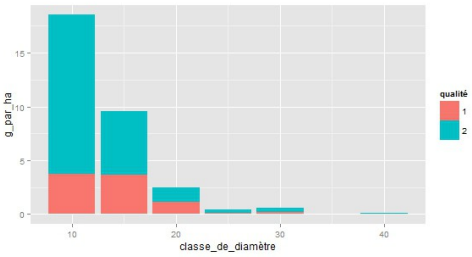
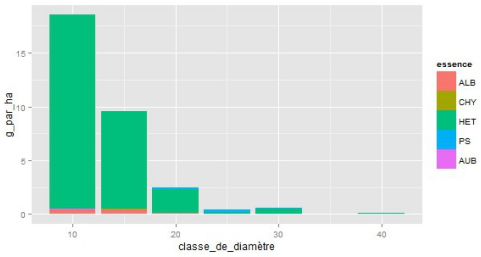
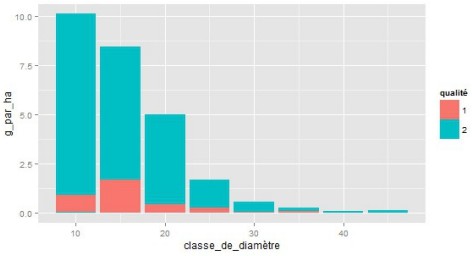
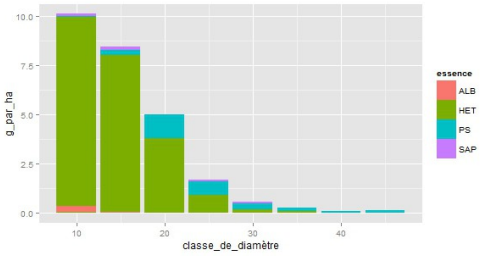
- **Nombre de tiges**

	N par qualité (tige/ha)	N par essence (tige/ha)
Antorbes		
Combe Maurel		
Pré d'Engande		
Tréboux		

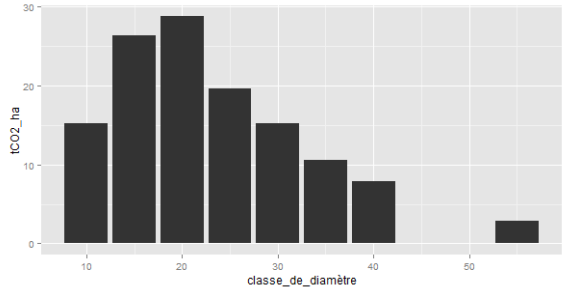
Codification des essences

Hêtre	HET	Sapin pectiné	SAP
Pin sylvestre	PS	Érable sycomore	ERS
Alizier blanc	ALB	Chêne pubescent	CHY
Aubépine sp.	AUB	Sorbier des oiseleurs	SOR
Cytise	CYT		

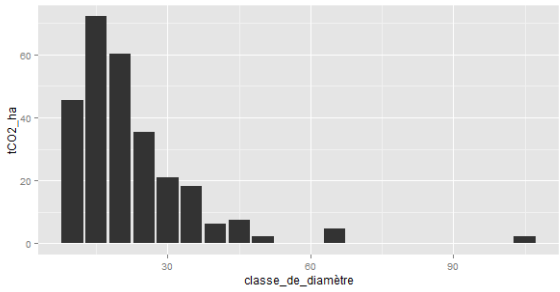
- **Surface terrière**

	G par qualité (m²/ha)	G par essence (m²/ha)
Antorbes		
Combe Maurel		
Pré d'Engande		
Tréboux		

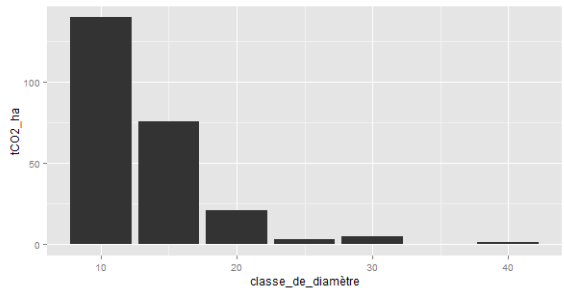
- **Tonnes de dioxyde de carbone par hectare**



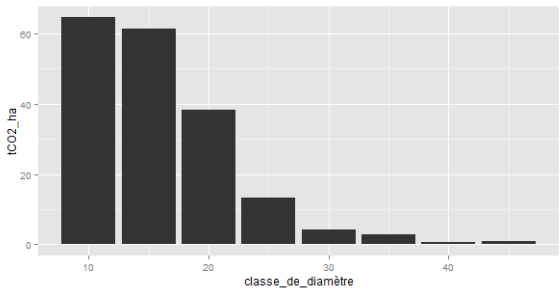
Antorbes



Combe Maurel

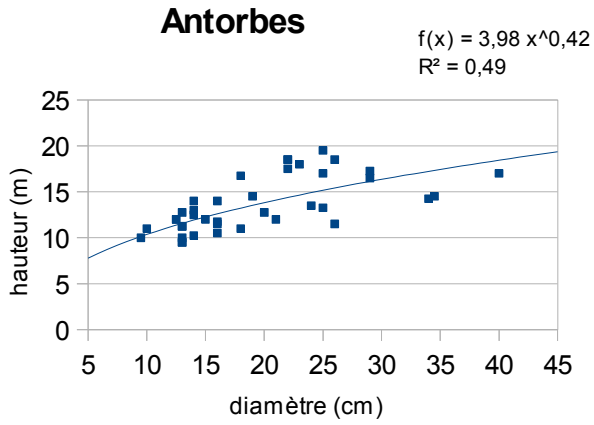


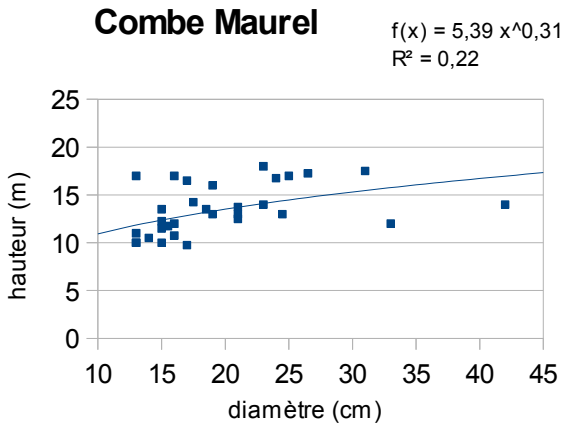
Pré d'Engande

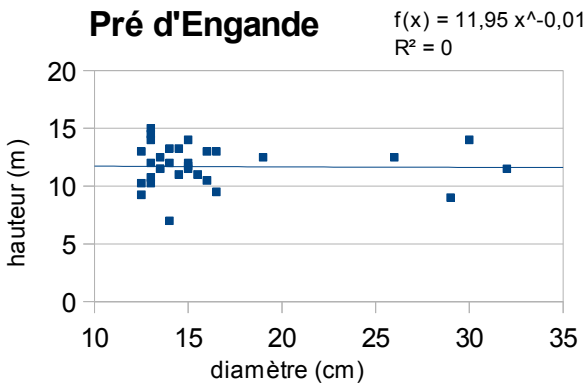


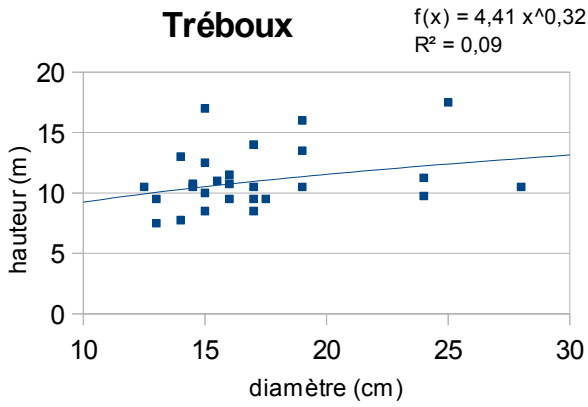
Tréboux

- **Relations hauteur-diamètre**









Annexe nº 6 : Script de calcul du diamètre dominant

Ci-dessous se trouve un script permettant le calcul, sous R, du diamètre dominant (diamètre moyen des 100 plus grosses tiges à l'hectare) à partir d'un tableau de répartition du nombre de tiges par classe de diamètre issu d'un inventaire.

Le tableau de données initial `n_qual` contient le nombre de tiges par hectare (variable `n_par_ha`) et par classe de diamètre (variable `classe_de_diamètre`) ainsi que, dans ce cas par qualité (qui n'entre pas dans le calcul). Le package doBy est nécessaire.

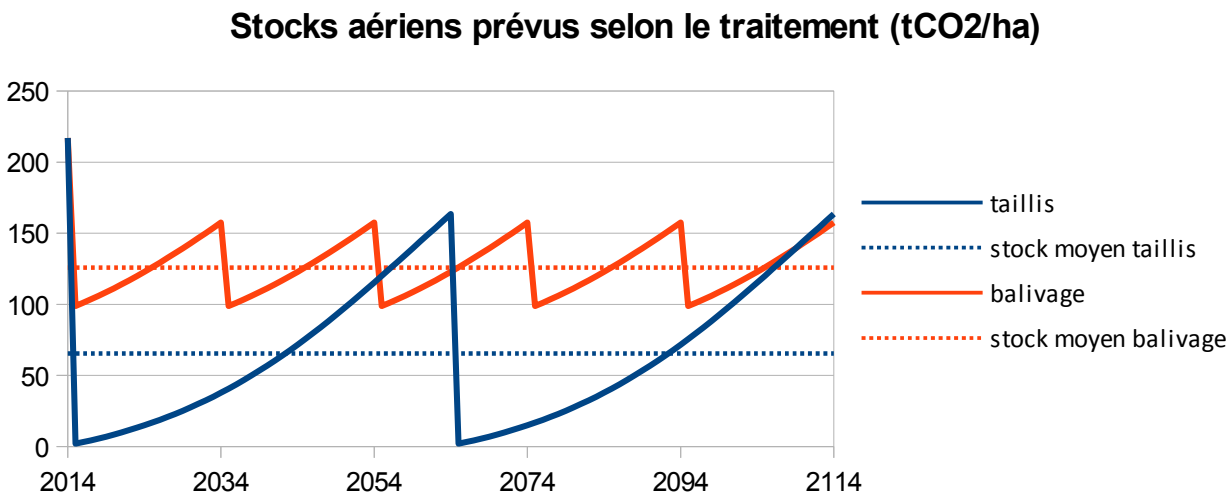
```
library(doBy)
###---- détermination du Do ----
a <- summaryBy(n_par_ha ~ classe_de_diamètre, data=n_qual, order=T, FUN = sum)
a <- orderBy(~ - classe_de_diamètre, a)
a <- na.exclude(a)
a$cumulé <- cumsum(x=a$n_par_ha.sum)

for(i in 1:dim(a)[1]){
    if(a$cumulé[i] < 100){
    a$dominant[i]=a$n_par_ha.sum[i]
  }else{
    if(a$cumulé[i-1]<100){
    a$dominant[i]=100-a$cumulé[i-1]
    }else{
      a$dominant[i]=0
    }
  }
}
a$g <- pi/40000*a$classe_de_diamètre^2*a$dominant
do <- round(sqrt(4*sum(a$g)/pi/100)*100,digits=1)
```

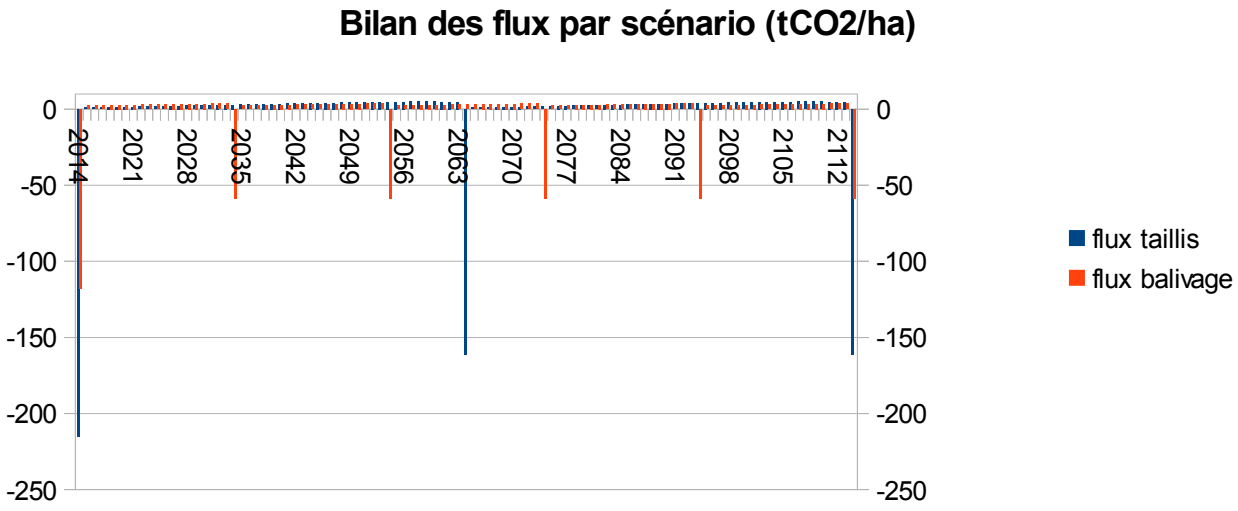
Dans le cas du site du Tréboux, par exemple, le tableau `a` qui contient la répartition des 100 plus grosses tiges (`dominant`) est de la forme suivante :

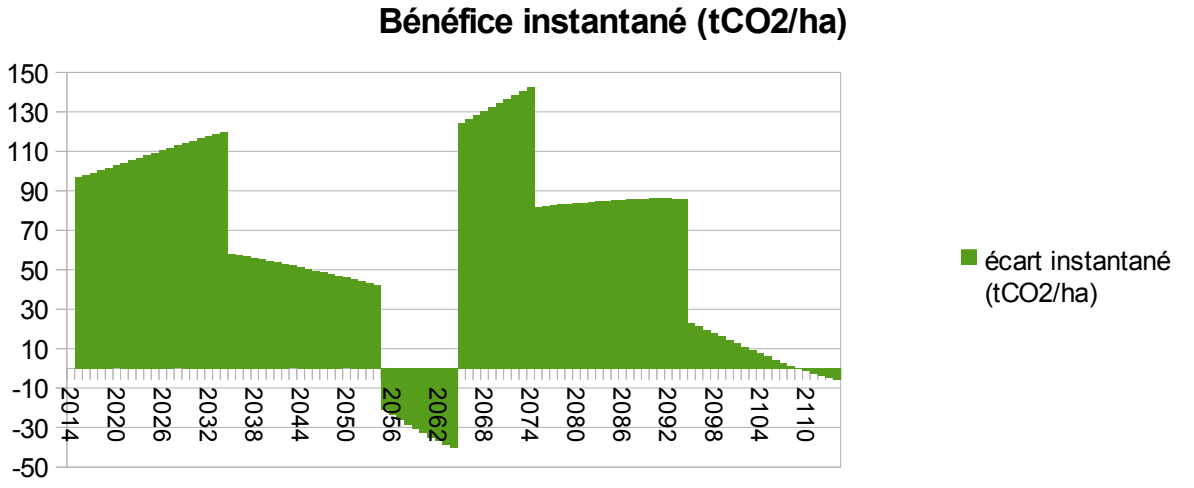
```
> a
 classe_de_diamètre n_par_ha.sum      cumulé  dominant         g
                 45     1.061806    1.061806  1.061806 0.1688729
                 40     1.069414    2.131220  1.069414 0.1343866
                 35     3.138713    5.269933  3.138713 0.3019796
                 30     8.274718   13.544651  8.274718 0.5849053
                 25    36.311975   49.856626 36.311975 1.7824599
                 20   166.929381  216.786007 50.143374 1.5753006
                 15   512.658569  729.444576  0.000000 0.0000000
                 10  1283.415540 2012.860115  0.000000 0.0000000
```

La dernière ligne du script calcule le diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne parmi les dominant. On obtient ainsi D_o.

Annexe nº 7 : Scénarisation et résultats en fertilité 2-3





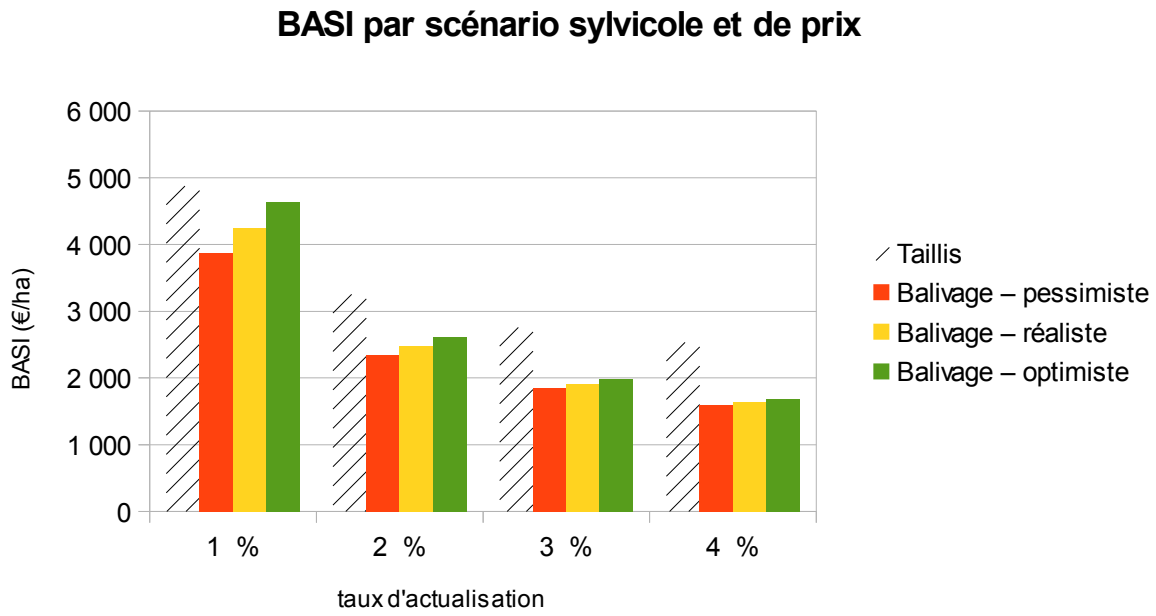


Récapitulatif des bénéfices carbone (fertilité 2-3) :

Taux d'actualisation	1,01 %[8]	2 %	3 %	4 %
Bénéfice Potentiel d'Atténuation	60	60	60	60
BASI « Carbone »[9]	**66**	70	74	**78**
1/26e des écarts en séquence infinie	253	138	98	**78**
1/100e des écarts en séquence infinie	**66**	36	26	20

Résumé des BASI selon le traitement sylvicole, le scénario de prix et le taux d'actualisation et représentation graphique :

Taux d'actualisation	Taillis	Conversion vers la futaie		
		pessimiste	réaliste	optimiste
1 %	4 878	3 878	4 255	4 633
2 %	3 256	2 349	2 482	2 615
3 %	2 756	1 848	1 913	1 978
4 %	2 534	1 603	1 640	1 677



8 Ce taux est arrondi, la valeur exacte est 1/99.
9 Ce BASI est la différence entre le BASI des flux engendrés par l'itinéraire de balivage et celui du taillis.