

Mémoire de fin d'études

**Pour l'obtention du Master 2 - Mention Economie appliquée
Spécialité : Chargé d'études économiques, développement
local contrôle organisationnel**

Thème :

**En quoi l'analyse économique
permet-elle d'informer les choix de
gestion sous incertitude climatique ?
Étude pilote sur le cas du douglas**

Présenté par :

Abdoulaye SACKO

Sous la Direction de

Marielle BRUNETTE

Chargée de Recherche LEF/INRA

Résumé

Dans ce mémoire, nous étudions l'impact d'un aléa sécheresse sur les décisions d'un propriétaire forestier. L'étude utilise deux scénarios sylvicoles (long, court) d'un peuplement de douglas avec une analyse du comportement du propriétaire forestier en univers incertain. Sur les données des deux scénarios, nous montrons qu'avec une bonne fertilité ou une faible fertilité du sol le scénario court est plus rentable financièrement que le scénario long. Ensuite avec un coût supplémentaire pour la faible fertilité les résultats sont presque identiques. Les résultats semblent donc plaider en faveur d'une révolution courte.

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement ma tutrice de stage Marielle Brunette, pour m'avoir accueillie au Laboratoire d'Economie Forestière (LEF) de Nancy et m'avoir permis de réaliser cette étude. Je remercie également les doctorants du Laboratoire, Eric Kéré, Nicolas Robert, Ophélie Darses, Sylvain Caurila pour les conseils et l'appui méthodologique qu'ils m'ont apportés tout au long du stage.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Nathalie Bréda (INRA Champenoux) qui m'a consacré du temps et m'a fourni les données sur les probabilités de sécheresse, à Olivier Picard (CNPFP) et Max Penneroux (SF-CDC) pour les données sylvicoles.

Je souhaite également témoigner ma reconnaissance envers le RMT AFORCE pour le financement de mon stage.

Je tiens aussi à remercier Anne Stenger, Serge Garcia, Philippe Delacote, Franck Lecocq, Jens Abildtrup, Katharina Shone, Max Bruciamacchie, Ahmed Barkaoui, Claire Montagné, Alexandra Niedzwiedz, Olivier Seiler, Evelyne Lenel, Annick Demange-Jaouen, qui, malgré leur emploi du temps chargé, ont su me guider tout au long de ce stage.

Enfin, j'adresse mes vifs remerciements à l'endroit de tous les enseignants du Master 2 Chargé d'études économiques de l'Université de Metz, spécialement à Laurent Spang responsable du Master.

Table des matières

Introduction Générale.....	6
Chapitre I : Etat des lieux de la forêt française	8
1. Description	9
2. La filière forêt bois en France.....	13
2.1. La filière de bois d'œuvre (feuillus et résineux).....	14
2.2. La filière bois d'industrie.....	14
2.3. La filière de bois énergie.....	15
3. Le marché du carbone.....	15
Chapitre II : Revue de la littérature.....	17
1. Impacts potentiels du changement climatique sur la forêt.....	18
1.1. Les conditions extrêmes.....	18
1.2. Incendie.....	18
1.3. Les insectes et les maladies.....	19
1.4. La productivité.....	19
1.5. Migration des espèces.....	19
1.6. La biodiversité.....	20
2. Sensibilité du douglas aux événements naturels.....	21
2.1. Tempête.....	22
2.2. Sécheresse.....	22
3. Les mesures d'adaptations proposées.....	23
3.1. Le marché de l'assurance.....	23
3.2. Mesures proposées par la société forestière.....	24
3.3. Réduction de l'âge de rotation.....	25
3.4. Modifications d'essences.....	26
Conclusion.....	29
Chapitre III : Analyse empirique.....	30

1. Présentation du cas pratique.....	31
1.1. Quelques généralités sur le douglas	31
1.2. Les perspectives de récolte.....	32
2. Présentation des données.....	33
2.1. Données sylvicoles.....	33
2.2. Les données relatives à l'aléa sécheresse.....	35
2.2.1. Faible fertilité/bonne fertilité.....	36
2.2.2. Les probabilités.....	36
2.3. Les méthodes et concepts utilisés.....	38
2.3.1. Les origines de l'économie forestière.....	39
2.3.2. Le taux d'actualisation.....	40
2.4. Cadre d'analyse et outils.....	41
3. Analyse des résultats.....	43
3.1. Calcul de la valeur actuelle nette du scénario long/court.....	43
3.2. Données du problème.....	45
3.2.1. Cas simple	47
3.2.2. Cas avec risque.....	41
3.2.3. Faible fertilité avec coût supplémentaire.....	53
Discussion et Conclusion	56
Bibliographie	58
Annexe 1 : Résultat de la valeur actuelle nette scénario long.....	62
Annexe 2 : Résultat de la valeur actuelle nette scénario court.....	62
Annexe 3 : Résultats des LEV stratégies.....	63

Liste des tableaux

Tableau 1 : La forêt en Europe en 2009.....	9
Tableau 2 : Evolution des surfaces forestières.....	11
Tableau 3 : Surfaces, volumes sur pied et productions courantes.....	12
Tableau 4 : Changement des aires de répartition des essences.....	20
Tableau 5 : Scénario sylvicole long.....	34
Tableau 6 : Scénario sylvicole court.....	35
Tableau 7 : Probabilité bonne fertilité hydrique (RU= 127 mm).....	37
Tableau 8 : Probabilité faible fertilité hydrique (RU= 97 mm).....	37
Tableau 9 : Rentabilité et rendements du scénario long.....	43
Tableau 10 : Rentabilité et rendement du scénario court.....	44
Tableau 11 : LEV des différentes stratégies.....	51
Tableau 12 : Variation du taux d'actualisation sur le LEV.....	53
Tableau 13 : LEV stratégies en faible fertilité avec un coût.....	55

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de la filière Bois	13
Figure 2 : Perspective de production de sciage du massif de douglas jusqu'en 2030.....	33
Figure 3 : Arbre de décision bonne fertilité.....	49
Figure 4 : Arbre de décision faible fertilité.....	50

Introduction générale

Le climat change naturellement au fil du temps en réactions aux différentes variations de la terre, de l'activité solaire et de la composition de l'atmosphère (Girardin et al., 2006). La plupart de ces facteurs causent toutefois des changements climatiques qui se produisent sur une longue période. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les modifications de la composition de l'atmosphère sont d'origine anthropique. Elles seront le principal facteur des changements climatiques qui se produiront dans le prochain siècle (GIEC, 2007). Les estimations et les projections du GIEC sur l'augmentation des températures à l'horizon 2090 varient de 1,8°C, selon le scénario le plus optimiste, à 4,0°C selon le scénario le plus pessimiste. Pour la France, il prévoit une augmentation des températures d'environ 2,5°C à 3,5°C selon le scénario B2, optimiste, voire même 4°C à 5°C selon le scénario A2, pessimiste¹.

Ces changements climatiques vont avoir un impact majeur sur l'environnement, notamment sur les forêts. En effet, le climat a une influence directe sur les processus biologiques et écologiques. Il affecte la régénération, la phénologie et les liens entre les espèces en interactions, la respiration, la photosynthèse, la consommation en eau et la transpiration (Roman-Amat, 2007). Il peut également entraîner des pertes de production plus fréquentes dues à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des aléas naturels tels que la tempête, la sécheresse, l'incendie et favoriser le développement des maladies et des parasites (Williamson et al., 2008).

Les impacts du changement climatique dans le secteur forestier et la nécessité d'adaptation² sont des problématiques qui inquiètent (cf le Plan National d'adaptation au changement climatique). Une réponse immédiate devrait permettre de réduire la vulnérabilité des forêts. Face à ces impacts attendus du changement climatique, des mesures d'adaptation doivent être prises. Ces mesures ont pour objectif d'adapter les forêts aux changements climatiques à venir c'est-à-dire de tenter de réduire les dommages potentiels. Ces mesures d'adaptation sont d'autant plus importantes dans

¹ Ces deux scénarios, A2 et B2, sont par ailleurs les scénarios retenus dans le « Plan national d'adaptation au changement climatique ».

² L'adaptation est définie comme « l'ensemble des évolutions d'organisation, de localisation et de techniques que les sociétés devront opérer pour limiter les impacts négatifs du changement climatique et en maximiser les effets bénéfiques » (Perthuis et al., 2010).

le secteur forestier du fait de la dimension de long terme et d'irréversibilité de l'investissement.

Toutefois, bien qu'il soit certain qu'il se produira des changements dans le fonctionnement des écosystèmes forestiers, il n'y a aucune certitude quant à l'ampleur et au rythme du changement. A cette incertitude sur les impacts du changement climatique s'ajoute une incertitude sur la capacité d'adaptation des essences au climat futur.

C'est dans ce cadre d'incertitude sur l'adaptation des essences au climat futur que s'insère mon projet de stage. En effet, il est question de s'intéresser à l'adaptation du douglas au changement climatique. Le domaine d'étude est une forêt de douglas gérée par la Société Forestière de la Caisse des Dépôts et Consignations.

L'adaptation des forêts au changement climatique et plus particulièrement du douglas, a rarement fait l'objet des travaux économiques. L'objectif de ce stage est donc de sélectionner et de mettre en œuvre des outils économiques permettant de guider les propriétaires forestiers dans leurs choix de gestion en présence d'incertitude. Concrètement, cela implique de croiser différents scénarios climatiques avec différentes options de gestion sylvicoles et de réaliser ensuite des comparaisons entre les divers itinéraires obtenus. L'idée étant d'éclairer le décideur sur les impacts économiques de situations futures potentielles.

Dans une première partie, ce rapport présente un état des lieux de la ressource forestière en France et de sa filière d'exploitation forêt bois. Puis, dans une deuxième partie, à travers une revue littérature, ce rapport recense les travaux économiques existants en matière d'adaptation des forêts au changement climatique. Enfin, dans une troisième partie, il décrira une analyse empirique.

Chapitre I : Etat des lieux de la forêt française

Cette partie est constituée d'une synthèse d'informations et de données, recueillies auprès de l'Inventaire Forestier National (IFN), afin de faire un état des lieux de la forêt française ainsi que la filière forêt bois et le marché du carbone.

1. Description

La forêt française représente plus de 16,9 Millions d'hectares de terres boisées, soit près de 31% du territoire national. La forêt privée est majoritaire en France, avec un peu plus de 10 Millions d'hectares soit près de 73,6% de la surface boisée nationale. Seul 26% de la surface est publique, dont 40% détenue par l'Etat, et pour le reste par les communes. Cette répartition varie très fortement selon les régions : les forêts communales et autres forêts publiques non domaniales sont importantes dans les régions Est de la France (Alsace, Bourgogne, Franche Comté et Lorraine) et quasiment inexistante dans le Sud-ouest.

Dans les 27 pays de l'Union Européenne le taux de boisement de la forêt est de 31% et ce taux paraît faible par rapport au 39% de la moyenne mondiale. Mais ils produisent plus de 15% du volume de bois commercialisé dans le monde. Avec quelques 155 millions d'hectares de forêt en tout c'est plus du tiers de la surface boisée en Europe.

La France, représente 10% de la surface boisée européenne dont plus du tiers est situé en Finlande et en Suède (voir tableau 1). En comparant la forêt française avec celle des voisins, la France est relativement bien garnie en essences forestières puisqu'elle arrive au troisième rang en termes de ressource par habitant.

Tableau 1: La forêt en Europe en 2009

	Surface totale M d'ha	Forêts M d'ha	Forêts Mm ³ sur écorce**	Production bois rond Mm ³ sous écorce**	Production sciages M m ³ sous écorce
Allemagne	34,9	11,1	2 880	48,7	19,5
Autriche	8,3	3,9	1 159	12,9	11,1
Belgique/Luxembourg	3,3	0,7	198	4,6	1,3
Bulgarie	11,0	3,7	568	2,6	0,3
Chypre	0,9	0,2	8	0,01	0,01
Danemark	4,2	0,5	76	0,8	0,2
Espagne	49,9	17,9	888	14,2	3,7

Estonie	4,2	2,3	447	5,5	2,0
Finlande	30,5	22,5	2 158	49,3	13,5
France	55,0	15,5	2 465	31,3	9,8
Grèce	12,9	3,7	177	0,5	0,2
Hongrie	9,2	1,9	337	3,0	0,2
Irlande	6,9	0,7	65	2,5	0,9
Italie	29,4	10,0	1 447	2,9	1,6
Lettonie	3,2	2,9	599	11,8	3,9
Lituanie	6,2	2,1	400	4,9	1,5
Malte	0,032	n.d	0*	0*	0*
Pays-Bas	3,4	0,4	65	0,7	0,3
Pologne	30,6	9,2	1 864	29,3	3,7
Portugal	9,2	3,8	350	10,9	1,1
République Tchèque	7,7	2,6	736	14,4	3,9
Roumanie	23,0	6,4	1 347	12,8	4,6
Royaume-Uni	24,1	2,8	340	8,0	2,8
Slovaquie	4,8	1,9	494	6,9	1,8
Slovénie	2,0	1,3	357	1,8	0,5
Suède	41,2	27,5	3 155	61,4	16,9
Total Europe des 27	419,0	155,5	22580	341,7	105,3

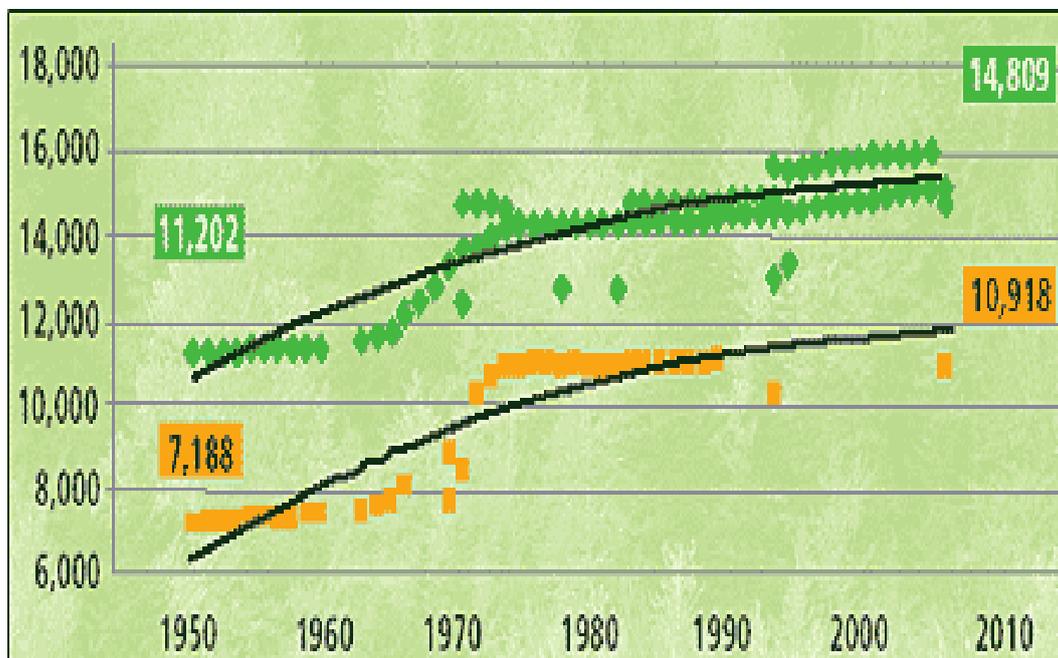
*Valeur très faible.

*La FAO prend en compte le volume de la tige jusqu'au bourgeon terminal (découpe 0) M= millions

Source : Mémento de FCBA 2008-2009

En effet, l'Inventaire Forestier National (IFN) dans son enquête de 2008, montre que les forêts françaises sont détenues par 3,5 millions de propriétaires forestiers.

Tableau 2 : Evolution des surfaces forestières



Source : Forêt privée Française 2010

Les forêts de l'ensemble du territoire national peuvent être classées en deux grandes catégories :

- **Les forêts de production de bois** : les forêts de production sont des forêts à vocation économique et il n'existe pas de restriction pour l'exploitation du bois. Elles représentent près de 91% de l'ensemble de la forêt, et sont réparties en trois types : les forêts domaniales représentent 9,5% et autres forêts publiques 15,4%, et les forêts privées 75,1%. Le douglas, qui est l'objet de notre étude, a une production totale en surface terrière dans les forêts de production est estimée à 506 000 m²/an (L'IF n°28 du 3^e et 4^e trimestre 2011).
- **Les autres forêts** : ce sont les forêts qui possèdent des restrictions légales, économiques ou techniques pour l'exploitation du bois. Cette catégorie représente près de 9% de l'ensemble des forêts. On distingue les forêts protégées par les parcs nationaux et les réserves naturelles, les forêts ne

faisant pas l'obtention de protection particulière, mais se trouvant dans des zones enclavées dont les coûts liés à l'exploitation seraient trop élevés.

Le volume de bois sur pied dans les forêts françaises est estimé en 2010 à près de 3 milliards de m³. La capitalisation des bois sur pied se poursuit comme dans les autres grands pays européens soit un accroissement de 650 millions de m³ dans le dernier quart du siècle (L'IF n°27 de juin 2011). Elle est surtout composée de feuillus soit plus de 63% du volume sur pied et deux tiers de la surface boisée de production. Les essences qui contribuent le plus au volume total sur pied sont les chênes sessiles et pédonculés pour 28% du stock, le hêtre 15%, l'épicéa commun 13%, le pin maritime et le sapin 10% chacun.

Tableau 3: Surfaces, volumes sur pied et productions courantes sur écorce des forêts de productions massifs selon la ou les essences dominantes

	Surfaces		Volumes m ³ /ha	Productions m ³ /ha/an
	X 1000 ha	%		
Chêne	5 387	36	166	5,6
Hêtre	609	4	215	6,3
Châtaignier	336	2	166	8,8
Autres feuillus	2 208	15	117	5,9
Mélanges de hêtre, sapin et épicéa	400	3	273	9,2
Mélanges feuillus résineux	1 399	9	160	7,3
Sapin ou épicéa	668	5	333	15,1
Pin martine	807	5	182	11,8
Autres pins	934	6	143	5,9
Douglas	249	2	259	19,7
Autres résineux	127	1	210	11,1
Autres peuplements	1 844	12	75	3,6

Source : Mémento de FCBA 2008-2009

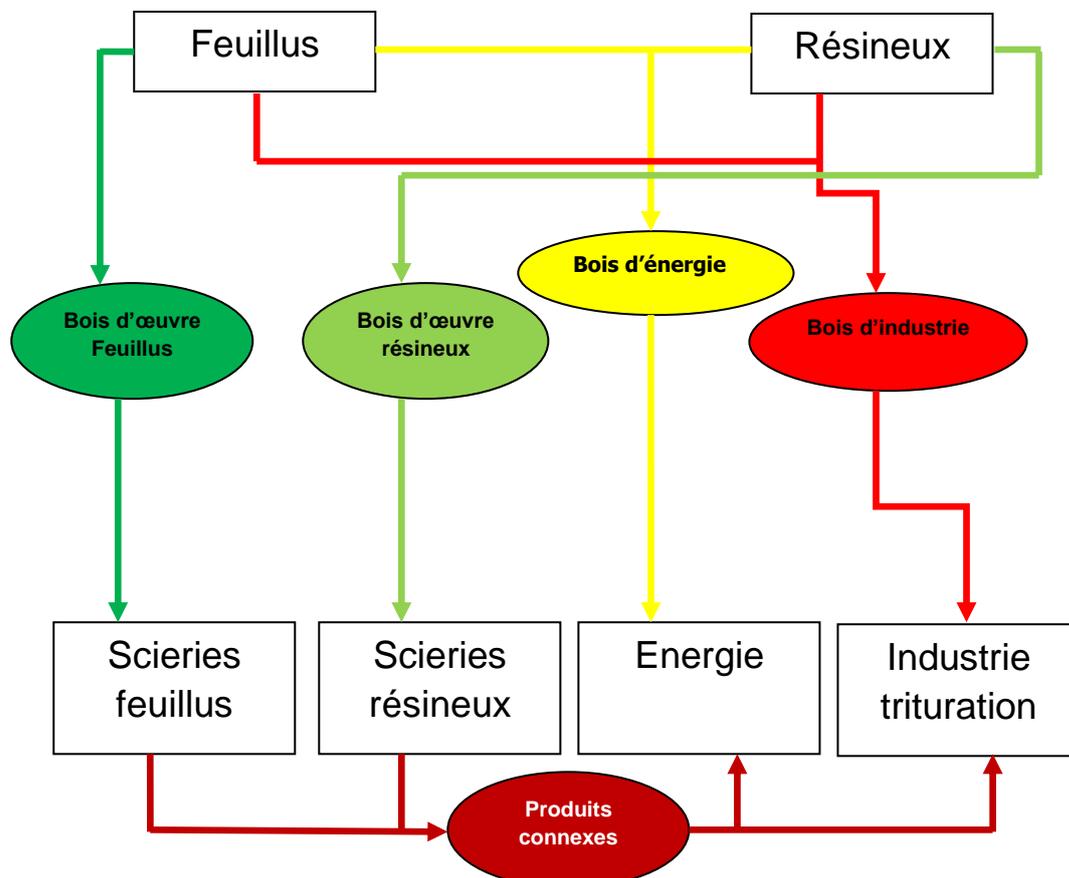
2. La filière forêt bois en France

La définition du mot filière indique que c'est l'ensemble des activités, des industries, relatives à un produit de base. Ainsi, dans la filière bois le produit de base est donc l'arbre et plus globalement la forêt. Si on veut parler de filière bois il faut prendre en compte l'ensemble des agents économiques dont l'activité est de produire, de gérer, de mobiliser, de commercialiser et de mettre en œuvre les produits issus du bois.

La forêt française est la première en Europe en termes de volume de bois sur pied (forêts de résineux et de feuillus), mais elle est dernière en termes de consommation de bois par habitant. La filière emploie près de 500 000 personnes soit 2,7% de la population active. Aujourd'hui la filière forêt bois française, c'est plus de 40 milliards d'euros de chiffres d'affaires, et représente 3% du Produit Intérieur Brut National. Le marché du bois se classe en cinquième position dans les échanges internationaux.

Les produits de l'exploitation forestière approvisionnent différentes filières de production. Ainsi, on distingue trois filières, la filière des bois d'œuvres d'industrie (feuillus et résineux), la filière du bois d'industrie (majoritairement l'industrie et la trituration) et la filière de bois énergie.

Figure 1 : Schéma de la filière bois (Ecobiom, 2009)



La répartition de la production de bois brut entre ces filières obéit à des exigences économiques. Cette répartition repose aussi sur des normes techniques pesant sur chacune des filières.

2.1. La filière de bois d'œuvre (feuillus et résineux)

On appelle bois d'œuvre le bois qui est destiné à être scié, tranché, pour un usage en charpente et construction, menuiserie, ébénisterie. A ces fins, le bois d'œuvre doit posséder des caractéristiques particulières. D'une part, des caractéristiques techniques, dues à la nature même de l'essence, comme la durabilité du bois, la résistance, et le poids. Ainsi, les feuillus (chênes, hêtres, bouleau etc.), les résineux (mélèze, pin sylvestre, pin maritime, douglas, épicéa, etc.) ainsi que de nombreux arbres fruitiers sont des essences adaptées à une destination bois d'œuvre. D'autre part, on détermine si un arbre peut être transformé en bois d'œuvre selon ses caractéristiques (la taille de son diamètre, ses défauts éventuels comme les nœuds, la droiture de sa tige...) on détermine sa qualité de bois d'œuvre.

La structure de la forêt française est inadaptée aux besoins du marché. Aujourd'hui plus de 59% des volumes sur pied sont en effet représentés par des feuillus et 41% par les résineux. Le feuillu est et restera l'avenir de la forêt française, mais la tendance change, car les nouveaux marchés sont tournés vers le résineux, et les usages de feuillus et de résineux ne sont pas interchangeable.

Dans son enquête de 2009, l'IFN montre que la récolte de bois d'œuvre feuillus chute à 5,2 millions de m³ à cause du ralentissement de l'activité des entreprises qui subissent la crise économique. Quant aux résineux, la récolte augmente de 17,2 millions de m³ du fait de la tempête Klaus.

2.2. La filière bois d'industrie

La filière bois d'industrie constitue les catégories de bois, de petites dimensions et souvent issus des éclaircies réalisées dans les jeunes peuplements, transformés en plaquettes pour l'industrie de la papeterie et des panneaux-bois. La récolte de bois d'industrie est estimée à 12,7 millions de m³ avec 97% du bois pour la trituration et 3% pour les autres bois industriels.

2.3. La filière de bois énergie

Le bois énergie est constitué de bois de chauffage et charbon de bois qui n'est plus utilisé en bois d'œuvre ni en bois d'industrie.

La filière s'inscrit dans l'idée de développer des énergies renouvelables dans un contexte de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour lutter contre le changement climatique. Mais aussi pour limiter la dépendance énergétique nationale. Ainsi, la stratégie des politiques publiques est de renforcer, pour les années à venir, la contribution du bois à la panoplie énergétique nationale et européenne. D'ici 2020, la France a pris des engagements de produire 23% de sa consommation énergétique finale à partir de sources renouvelables au lieu de 10% en 2005. Il s'agit de relever un défi de taille, car il est prévu que la filière bois énergie fournisse à elle seule 9,4 millions de foyers.

Le secteur est activement aidé par des dispositifs comme le crédit d'impôt ou les certificats d'économie d'énergie, et le marché est appelé à se développer dans les prochaines années.

Pour une analyse plus précise de la filière forêt bois, il est judicieux de parler du marché du carbone qui met en valeur une autre fonction de la forêt.

3. Le marché du carbone

La forêt française absorbe 72,3 millions de tonnes de CO₂ par an (Deheza et Bellassen, 2010). Lors de leurs croissances, les forêts, par photosynthèse, absorbent le CO₂ de l'atmosphère et rejettent de l'oxygène afin de former des chaînes carbonées.

Au regard du changement climatique, il est clair que le rôle des forêts est primordial. En effet, en augmentant les surfaces forestières, il est possible d'augmenter l'absorption du carbone. Par ailleurs, la déforestation provoque des émissions massives de CO₂. Il est donc possible de lutter contre la déforestation pour éviter ces émissions. Les produits bois aussi stockent du carbone et peuvent se substituer à des matériaux énergétiques, comme le béton ou l'acier, et à des énergies fossiles, comme le charbon, le gaz ou le pétrole.

Par conséquent, la forêt par son autre fonction qui est la rémunération des services non marchands est un enjeu important. En effet, les crédits carbone peuvent rémunérer les services environnementaux que fournissent les forêts. Cette source de revenus peut être importante, mais elle ne peut être une source de financement car les barrières à l'investissement restent particulièrement nombreuses pour les projets de carbone forestiers. Parmi ces barrières on a : investissements initiaux importants, retours sur investissement reportés dans le temps, manque de visibilité sur les marchés (Chenost, 2007).

En définitive, on peut dire que la forêt est un double acteur, elle subit le changement climatique et doit s'adapter et en même temps elle lutte contre ce réchauffement climatique en stockant du carbone.

Pour aider la forêt à garder ces différentes fonctions, l'adaptation sera une nécessité. La revue de la littérature qui va suivre permet de recenser quelques travaux sur les impacts potentiels du changement climatique, les mesures d'adaptations existantes, ainsi qu'une vision économique de l'adaptation.

Chapitre II : Revue de la littérature

La revue de littérature que nous allons parcourir vise à recenser les différentes recherches et analyses effectuées, tant en France que dans les autres pays, sur la question de l'adaptation des forêts au changement climatique.

Le constat est surprenant car, il n'existe que très peu d'études économiques s'attachant à comprendre l'adaptation des forêts au changement climatique. La plupart des recherches disponibles concernent plutôt des études écologiques sur l'adaptation future de la forêt.

Ce contexte de rareté fait que notre revue de la littérature va recenser plus largement les travaux portant sur le changement climatique et la forêt, les travaux relatifs à l'adaptation en faisant bien sur partie intégrante.

Le premier domaine traite des impacts potentiels du changement climatique sur la forêt. Dans le second domaine, nous nous attacherons à décrire la sensibilité du douglas aux événements naturels. Pour cela, nous présenterons les dégâts de la tempête de 1999 et de la sécheresse de 2003 sur l'essence douglas. Le troisième domaine concerne la littérature relative aux différentes mesures d'adaptations proposées ainsi que deux articles qui traitent du volet économique.

1. Impacts potentiels du changement climatique sur la forêt

Le GIEC a prévu que la température future allait croître ce qui va avoir des impacts divers sur les forêts.

1.1. Les conditions extrêmes

Selon le GIEC (2007), la fréquence et l'intensité des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes augmenteront probablement : orages, tempêtes de vent et de grêle, précipitations intenses, sécheresses, vagues de chaleur et hivers anormalement chauds. Graumlich (1993), et Parmesan et al. (2000) suggèrent que les manifestations météorologiques extrêmes et le changement climatique affectent la croissance et la morphologie des espèces. Ainsi une modification de ces conditions et des perturbations qui leur sont associées va probablement affecter la terre de plusieurs façons : favoriser les essences les mieux adaptées à la variabilité climatique et aux perturbations, affecter la dynamique des peuplements et alterner les processus de l'écosystème. Pour Peterson (2000), la fréquence et l'intensité des fortes tempêtes accompagnées de vents violents vont probablement augmenter avec le changement climatique. Ainsi les peuplements à faible densité et certains types de structure et d'orientation des peuplements sont particulièrement vulnérables aux vents. Par ailleurs, une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses sera particulièrement difficile dans les régions déjà sèches, et les arbres qui sont sensibles à ce fléau, poussant dans les sols à faible rétention d'eau sont très vulnérables (Spittlehouse, 2003).

1.2. Incendie

Il n'existe pour l'instant que des suppositions quant à la future évolution des feux de forêt dans un contexte de changement climatique. L'évolution du climat vers des conditions plus sèches en été peut potentiellement augmenter le danger de feux de forêts dans les massifs montagneux pendant la période estivale. Les principaux facteurs déterminant l'activité du feu sont les conditions météorologiques et climatiques, les activités humaines. Ainsi les superficies de parcelles incendiées

devraient augmenter et la saison des feux connaîtra un allongement en Europe méditerranéenne (Pausas, 2004).

1.3. Les insectes et les maladies

Les insectes et les maladies sont d'importants agents de changements et de renouvellement des forêts (Volney et Hirsch, 2005). Ainsi, le changement climatique pourrait constituer une source favorable aux parasites du fait de leurs grandes capacités d'adaptation³. Il est probable que le statut de certains insectes passera de relativement inoffensif à sévèrement destructeurs (Moore et Allard, 2008). Il faut noter que quand les températures sont élevées cela entraîne le développement et la reproduction des insectes.

1.4. La productivité

Il est difficile de déterminer les effets nets des changements climatiques sur la croissance des arbres car il y a plusieurs facteurs en interactions (Girardin et al., 2008). Par contre, selon le rapport de Roman-Amat (2007), le changement climatique augmentera la productivité des forêts à travers trois mécanismes : le réchauffement du climat, l'augmentation de la concentration du CO₂ et l'augmentation des précipitations. En d'autres termes, le facteur le plus important dans la croissance des arbres est la disponibilité du sol en eau. Logiquement il existe un fort potentiel de diminution de la productivité des forêts dans les régions qui sont sèches et un potentiel d'augmentation dans les régions où les précipitations sont importantes durant la période de croissance. Ainsi, les effets du changement climatique sur la croissance des plantes varieront en fonction des régions, la nature des essences et leur capacité d'adaptation au climat.

³ http://www.inra.fr/presse/processionnaire_du_pin_et_changement_climatique

1.5. Migration des espèces

Les chercheurs ont tenté d'estimer les aires de répartitions potentielles des espèces en 2100⁴. A partir de la situation actuelle ils ont établi des probabilités de présence des essences en fonction de certains paramètres climatiques (rayonnement, précipitation, température, évapotranspiration, jours de gel). Ils ont obtenus une répartition future des essences selon le tableau suivant :

Tableau 4: Changement des aires de répartitions des essences

	Actuel	2100 scénarios B2	2100 scénarios A2
Méditerranée	9,1%	28,1%	49,7%
Domaine Sud-Ouest	17,2%	45,9%	30,8%
Domaine Océanique Ouest	35,6%	17,4%	16,4%
Montagnard	15,6%	5,4%	3,7%
Domaine Continental Est	22,4%	3,2%	1,2%

Source : Roman-Amat (2007)

Deux constats ressortent de ce tableau : le premier est que les essences méditerranéennes (chêne vert) pourraient migrer et à l'opposé le hêtre qui est actuellement présent presque sur tout le territoire pourrait fortement baisser en raison de sa sensibilité au manque d'eau. Ceci étant, les essences forestières en générale peuvent aussi s'adapter y compris via l'adaptation génétique. La productivité des peuplements maintenus hors de leur aire de répartition potentielle est plus faible, et leur vulnérabilité aux chocs (incendies, maladies, etc.) est plus élevée (Lecocq, 2008).

⁴ Projet Climator (vise à fournir des méthodes et des résultats sur l'impact du changement climatique sur des systèmes cultivés variés, à l'échelle de la parcelle, et dans des climats contrastés français) et projet ANR (Agence Nationale de la recherche), « Quantification des effets des changements globaux sur la diversité global ».

1.6. La biodiversité

La biodiversité, ou la variété des différentes formes de vie, est intimement liée au climat de la terre et donc au changement climatique. Ce changement climatique pourrait entraîner la disparition de très nombreuses espèces. L'appauvrissement de la diversité animale et végétale est déjà un fait réel ainsi que le déplacement des espèces. Cette perte réduit le potentiel des systèmes naturels à réagir aux impacts d'un changement climatique rapide (Onerc, 2006). Selon Roman-Amat (2007), le changement climatique pourrait avoir sur la biodiversité les effets suivants :

- modifications des relations entre espèces (notamment chaînes alimentaires) ;
- modification de la reproduction des espèces ;
- déplacement des « aires climatiques » des espèces ;
- mortalités causées par des événements extrêmes ;
- modification de la composition de la structure des habitats, y compris par l'arrivée d'espèces invasives et de pathogènes ;
- augmentation du risque d'extinction notamment pour les petites populations ;
- changements dans l'utilisation des sols du fait de l'adaptation de l'agriculture et de la foresterie.

Pour Reid et Swiderska (2008), un tiers du carbone mondial enfouis se trouve dans les tourbières⁵, qui relâchent des gaz à effet de serre lorsqu'elles sont brûlées, mises à sec ou converties en terres d'assolement. Les tourbières sont aussi riches en biodiversité, et servent de sites de halte pour les espèces migratoires. Bien que les effets mesurables des pertes de biodiversité sur le changement climatique soient très variables, il est certain que la préservation de la biodiversité peut aider à limiter le changement climatique.

Il est donc prévu que le changement climatique ait un effet sur les événements extrêmes et sur la sécheresse, le risque d'incendie, la productivité, etc. nous allons donc regarder comment réagit le douglas à ces événements à partir de deux aléas naturels passés, les tempêtes de 1999 et la sécheresse de 2003.

⁵ Tourbières : sont des écosystèmes formés de végétaux dont la croissance, dans certaines conditions climatiques, parfois, topographiques, engendre l'accumulation d'importantes quantités de matière végétale. Celles-ci, après une transformation modérée biochimique et mécanique (décomposition très lente et très incomplète), forment une roche combustible renfermant jusqu'à 50% de carbone : la tourbe.

2. Sensibilité du douglas aux événements naturels

Sous l'impulsion du changement climatique, les aléas naturels futurs risquent d'être plus fréquents et plus dommageables. Dans ce point, il s'agit donc de présenter les dégâts de la tempête de 1999 et de la sécheresse de 2003 sur l'essence douglas. Cela permettra d'appréhender la sensibilité du douglas à de tels événements.

2.1. Tempête

Les tempêtes de 1999 ont détruit 12% du stock sur pied de douglas mais n'ont pas entraîné de modification profonde de la structure par classes d'âge des peuplements. Selon l'Institut Forestier National (IFN), le déficit moyen lié aux tempêtes reste modéré (6% pour 2006-2010), et le principal impact sera sans doute l'écart qui risque de se creuser entre la disponibilité dans les régions épargnées, comme la Bourgogne, et durement touchées, comme le Limousin (IFN, 2004).

Les dommages aux jeunes plantations depuis 2000 ont pu être évalués en 2004 à partir des déclarations effectuées par les propriétaires ayant bénéficiés de l'aide de l'Etat (Flot, 2005). Sur l'ensemble de la France, les plantations de douglas qui ont souffert de plus de 40% de mortalité représentent environ 7,4% des surfaces (DSF Massif Central, 2005). Malgré ces dommages, le douglas ne devrait pas cesser d'augmenter d'ici à 2015 où la production pourrait atteindre 1,4 Mm³/an, vraisemblablement jusqu'en 2035 (IFN).

2.2. Sécheresse

L'année 2003 est considérée comme une année exceptionnelle en France et en Europe. C'est un été qui est caractérisé par une sécheresse entre février et août à laquelle s'ajoute la canicule d'août (Landmann et al., 2003). Selon Bréda et al. (2004), les deux premières semaines d'août 2003, les forêts françaises ont fait face à des anomalies de températures d'environ (+ 4,9°C). En effet, le douglas a fortement réagi à la sécheresse de 2003. Le manque d'eau dans le sol et l'insolation ont

entraînés le rougissement du houppier⁶ de nombreux arbres, provoquant ainsi la défoliation⁷ totale voire la mort de certains arbres. Ce double stress a eu pour conséquence la mort de certains arbres l'année qui a suivie (Bréda, 2008).

Ainsi, il existe donc un seuil au-dessus duquel les arbres ne peuvent pas récupérer du stress subi. Dans une situation de manque d'eau, la température au niveau des feuilles peut être supérieure à la température de l'air et atteindre des températures néfastes autour de 45°C (Bréda et al., 2004 ; DSF 2003). Ainsi Bombraut et Vallée (2004) ont montré que les peuplements de douglas implantés sur un sol superficiel, à réserve d'eau faible ont été plus touchés que les autres. Pretet (2008) va dans le même sens en identifiant la réserve utile en eau comme étant le principal facteur pouvant limiter la production du douglas.

Ces deux exemples semblent indiquer que le douglas est sensible aux aléas naturels. Toutefois, il doit être moins sensible que d'autres essences car il est préconisé dans l'adaptation des forêts au changement climatique (Bréda, 2008). Ainsi, le développement des mesures d'adaptations est nécessaire pour faire face au changement climatique.

3. Les mesures d'adaptation proposées

Les impacts attendus du changement climatique sur les peuplements forestiers font de l'étude des capacités d'adaptation des peuplements un enjeu important. Ainsi, l'adaptation est devenue une nécessité pour la gestion et la rentabilité des peuplements forestiers. Ainsi, différentes mesures d'adaptations sont donc proposées :

3.1. Le marché de l'assurance

Les aléas augmentent sous l'impulsion du changement climatique et représentent donc une menace financière pour le propriétaire (perte d'argent) et pour l'humanité (perte d'arbres). Ainsi, développer et améliorer la couverture de la forêt par

⁶ Houppier : l'ensemble des parties aériennes d'un arbre, à l'exception de la base du tronc (le fût). Le houppier désigne donc les branches, les rameaux et le feuillage de l'arbre.

⁷ Défoliation : produit qui provoque la chute des feuilles des arbres.

l'assurance, avec la mise en place des procédures et des contrats permettrait de couvrir les risques principalement liés au changement climatique et d'assurer le reboisement.

En effet, dans la recherche de cohérence entre les objectifs de protections de la planète et de lutte contre les gaz à effet de serre, le protocole de Kyoto (1998) met en avant les mécanismes d'assurance pour faire face à l'adaptation au changement climatique. Ceci pourrait s'appliquer à la forêt. Toutefois, cela nécessite une refonte du système actuel d'assurance forêt en France. Une telle refonte est proposée par Puech (2009), dans son rapport « *Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois* », remis à Nicolas Sarkozy. Il propose trois schémas de stratégie à prendre pour la couverture du risque tempête en forêt :

- Les tempêtes et dégâts de faible ampleur seraient couverts par des mécanismes de nature individuelle via l'épargne avec un encouragement de l'Etat.
- Les risques de moindre fréquence mais d'ampleur plus importante doivent faire l'objet d'une mutualisation professionnelle via l'assurance.
- Enfin les risques majeurs doivent bénéficier d'une garantie de l'Etat pour la construction de la forêt, la perte financière étant couverte par l'assurance.

3.2. Mesures proposées par la Société Forestière

La stratégie adoptée par la Société Forestière de la Caisse des Dépôts et Consignation exposée dans une communication de Piermont (2007) est regroupée dans 3 axes :

Dans les peuplements en place

- les résineux et peuplement à renouveler avant 50 ans, il faut utiliser une sylviculture rapide classique et régulière, en courte révolution et adaptée au contexte économique, avec des densités plus faibles ;
- pour les peuplements à renouveler au-delà de 50 ans : ils sont classés selon la réserve utile du sol et les risques sont identifiés en fonction de ce critère ;

- mener toute action favorisant l'économie en eau.

Lors du renouvellement de peuplements

- Privilégier les essences à croissance rapide, introduire des essences ou variétés de transition, prendre des précautions particulières pour la régénération d'essence à croissance lente.

Mise en œuvre progressive et ouverte

- Concrètement, ce dispositif se met en place dans les plans de gestion et sur le terrain. Il s'accompagne d'actions de formation et des tests d'itinéraires techniques.

3.3. Réduction de l'âge de rotation

Dans le but de proposer des mesures d'adaptation efficaces, Lauzon (2004) a analysé les feux de forêt en Gaspésie dont 50% des arbres ont plus de 100 ans. Il montre que la présence d'un long cycle de feu est dommageable pour la forêt. Pour lui la seule pratique d'adaptation des forêts serait la révolution courte afin d'atteindre des objectifs en matière de gestion forestière, de développement durable et de maintien de la biodiversité.

Spittlehouse (2005, 2006, 2008) et Lemprière et al. (2008) discutent eux de certaines propositions pour améliorer les capacités d'adaptation aux chocs climatiques. Ils proposent ainsi les actions suivantes : augmenter le niveau de sensibilisation et déployer des efforts pour éduquer le secteur aux besoins d'adaptations, établir des objectifs pour les forêts futures et déterminer la vulnérabilité des écosystèmes forestiers. Développer des mesures économiques pour l'adaptation applicables à court et à long terme. Des propositions sur la diminution des rotations, l'âge de la récolte des peuplements sont évoquées pour faire face au risque climatique.

Puech (2009), dans son rapport aborde la question de l'effet des chocs climatiques sur la forêt. Il propose une analyse se basant principalement sur les changements globaux, dont le risque d'une occurrence accrue de tempêtes. Pour adapter la forêt, il propose une approche qui permettrait un accroissement à court terme de la récolte :

- Par suite de l'augmentation de la nutrition, gaz carbonique et minéraux, de la dégradation probable de l'alimentation en eau, et d'une hausse des températures estivales, il faut réduire la densité des peuplements, par des éclaircies fortes diminuant la surface foliaire, l'évapotranspiration et la compétition pour l'eau,
- Accélérer le renouvellement des peuplements risquant de dépérir, pratiquer des régénérations assistées, introduire des génotypes adaptés au climat à venir,
- Pour le risque de tempêtes, il faut des arbres moins élancés (donc encore des éclaircies fortes) et si possible moins hauts...

3.4. Modification d'essences

Costa et al., (2011) ont indiqué que de nombreux travaux biologiques s'étaient intéressés aux modifications d'essence comme outil d'adaptation des forêts au changement climatique : *"Several tree species were analysed under climate change scenarios depending on the forest type analysed. On the one hand, countries with boreal forests are interested in Scots Pine (Anderson and Fedorkov, 2004; Savolainen et al., 2004; Kellomäki et al., 2007; Kint et al., 2009). On the other hand, temperate forests dominates Europe with Norway spruce (Klimo et al., 2000; Spiecker et al., 2004; Bricenõ-Elizondo et al., 2006), oak (Becker et al., 1994) and European Beech (Kramer, 1996) and the north-western part of USA with Douglas-fir (Rehfeldt, 1989; Littell and Peterson, 2005; Nigh, 2006). European beech is also analysed from the point of view of Mediterranean forests (Tognetti et al., 1995; Sabaté et al., 2002; Jump et al., 2006; Bolte et al., 2007)".*

Ces auteurs soulignent également que peu de travaux économiques se sont intéressés à cette problématique, Hanewinkel et al., (2010) et Yousoufpour et al., (2010).

Hanewinkel et al., (2010), dans leur article ont montré que l'une des stratégies d'adaptation de la forêt face au changement climatique est l'adaptation par le temps des différents espèces d'arbres. Ils ont quantifié la résistance de l'épinette de Norvège dans un site en Allemagne du sud-ouest sous aléa climatique en vue de le changer avec le hêtre européen. Ils l'ont comparé à la moyenne des sites à bonne

productivité, estimé la variation moyenne des terres (LEV) associée au passage de l'essence épinette de Norvège à celle du hêtre européen. La particularité de l'étude est l'évaluation des conséquences financières de ce transfert en fonction des scénarios climatiques du GIEC (B1, A2) en prenant le LEV comme variable clé pour la détermination de la valeur de la forêt. Ils proposent une analyse de la sensibilité des paramètres (taux d'actualisation, durée de la rotation et niveau du risque).

Dans cet article, les auteurs analysent le risque sous deux angles : le premier basé sur la probabilité de transition pour l'épicéa et le hêtre, le second, sur la vulnérabilité des essences. Pour le second risque ils fondent leurs analyses sur les résultats de l'étude de Holeczy et Hanewinkel (2006).

Ainsi, l'une des conséquences du changement sur la durée de la rotation de l'épinette est la variation du taux d'actualisation qui est compris entre (1% et 3%) et le niveau de risque. Le taux d'actualisation a une forte influence sur les résultats, augmenter la rotation de l'épinette de Norvège conduit à une diminution de la LEV de 20% par rapport au hêtre européen et une baisse du taux d'actualisation diminue la différence relative entre l'épicéa et le hêtre, mais augmente de façon significative la différence absolue du LEV à des valeurs comprises entre 2 milliards euros pour les scénarios (B1/A2) à l'horizon 2030 et de 10 milliards euros pour le scénario (A2) en 2100 pour toute la forêt.

Yousoufpour et al., (2010) vont dans le même sens que Hanewinkel et al., (2010). Dans l'article, ils abordent la question de l'appréciation des stratégies d'adaptation et d'atténuation⁸ des essences pures d'épinettes de Norvège sous l'effet de choc climatique en tenant compte des objectifs des propriétaires forestiers. Ils proposent une étude axée sur huit scénarios sylvicoles comprenant cinq programmes de reconversion. Ces scénarios sont analysés comme des stratégies d'adaptation qui visent à augmenter la proportion du hêtre qui est considéré comme l'essence la mieux adaptée pour supporter le changement climatique par rapport à l'épinette de Norvège.

L'étude révèle que l'adaptation est prévue uniquement chez les jeunes classes d'âge, et les classes d'âge de plus de 70 ans sont traitées avec une stratégie

⁸ L'atténuation est la mise en œuvre de mesures destinées à réduire les effets indésirables d'une activité proposée sur l'environnement.

d'atténuation. Ils démontrent qu'une augmentation de la zone des classes d'âge améliore l'utilité globale du propriétaire forestier entre 97 euros/hectare et 216 euros/hectare. Et toute augmentation de 10% de la protection des plus anciennes classes d'âge diminuerait l'utilité globale de 4 euros/hectare. Enfin, les incidences financières des différentes stratégies vont de 103 millions d'euros entre adapter et ne rien faire à 30 millions d'euros pour adapter et le plan d'aménagement forestier optimal.

En outre, l'étude ne prend pas en compte la notion de risque ni dans le modèle de croissance, ni dans l'optique de modification des conditions climatiques. Les auteurs montrent que les stratégies qui visent à maintenir l'épinette de Norvège et le fait de sous-estimer le risque potentiel et croissant du changement climatique de la forêt d'épicéa pourraient influencer les résultats de l'optimisation. Ils démontrent que le fait de passer de l'épinette de Norvège au hêtre européen, suivi d'une diminution de la croissance de l'épinette et d'une augmentation de la croissance du hêtre aurait un effet limité sur les résultats de l'étude. Ces effets ont lieu à long terme. Sur le plan économique, ils se servent des résultats de Hanewinkel et al. (2010) pour montrer qu'il existe une différence mineure dans l'effet d'un changement de l'épinette au hêtre entre les scénarios B1 et A2 pour l'année 2030, et pour les prévisions de 2100 les conséquences économiques sont plus graves.

Cependant, ces deux articles ne s'intéressent pas au douglas particulièrement, et les modes de sylviculture n'ont pas été mis en avant, ils envisagent plutôt le changement d'essence pour faire face au changement climatique. Du point de vue économique, les bénéfices qu'aurait un propriétaire forestier en adoptant une stratégie d'adaptation de son peuplement n'est pas abordée. Ainsi, dans le cadre de ce stage, on compte mettre en avant le critère de Bénéfice actualisé en séquence infini (BASI) de Faustmann (1848), ce critère nous permettra d'arbitrer entre différentes options de sylviculture sous changement climatique.

Conclusion

Le rôle de cette revue de littérature est de présenter les travaux existants sur le changement climatique et son impact sur la forêt, la sensibilité du douglas. Ces changements auront des conséquences importantes sur la capacité des propriétaires à gérer les peuplements de façon économique et durable.

Ainsi, un des éléments les plus marquants de cette situation est que nous affrontons des niveaux élevés d'incertitude concernant le climat futur, ses effets sur la forêt ainsi que les impacts potentiels sur les choix de gestion forestière. Mais cette incertitude ne doit pas être une barrière, ni empêcher d'entreprendre le processus d'adaptation même si elle peut rendre cette adaptation un peu complexe. Les biologistes ont su répondre présents et apporter des solutions et des réponses (cf les travaux de Nathalie Bréda). Le premier constat est qu'à notre connaissance, seuls quelques articles traitent de cet aspect avec une approche économique. Or, l'impact économique du changement climatique sur les forêts est bien réel, et cela nous amène à nous interroger sur la capacité des outils économiques à l'analyser.

Chapitre III : Analyse empirique

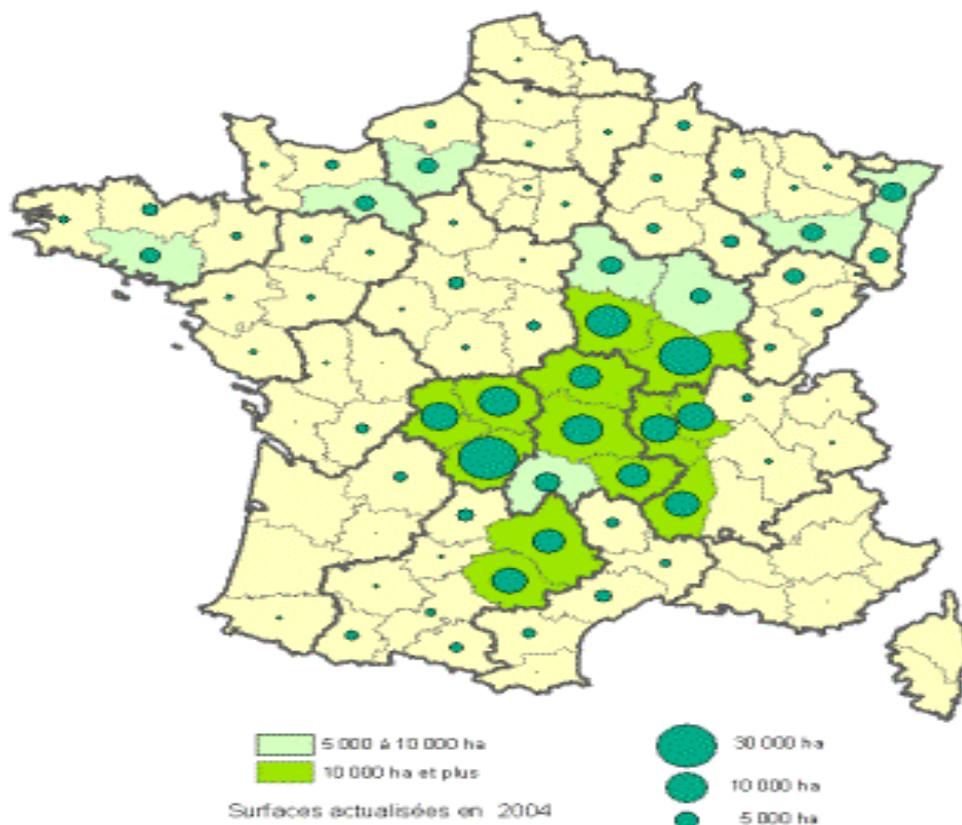
Cette Analyse empirique porte sur un peuplement de douglas face à un risque sécheresse. Nous commençons par faire une présentation du cas pratique, une présentation des données utilisées pour l'étude, ensuite une analyse des résultats.

1. Présentation du cas pratique

Nous allons donc présenter tout t'abord quelques généralités sur le douglas, ensuite nous présenterons les données dont nous disposons et la méthode et les concepts utilisés.

1.1. Quelques généralités sur le douglas

Le Douglas est un arbre connu sous le nom scientifique de (*Pseudotsuga Meuziesil*). Son introduction en Europe est l'œuvre du botaniste David DOUGLAS (1799-1834). Il a une grande importance en France, et occupe aujourd'hui une surface moyenne évaluée à 400.000 hectares et un volume sur pied estimé à 88 millions de m³ (IFN, 2010). Les principales régions qui exploitent le douglas sont la Bourgogne, le Limousin, l'Auvergne, le Rhône-Alpes et le Midi-Pyrénées. Il est aussi réparti dans 13 départements du grand massif central, sa surface dépasse 10.000 hectares. En 2010, le volume en moyenne dans les forêts de production est estimé à 97 millions de m³.



Source : IFN-Afocel Répartition du Douglas en France en surface, 2004

Sa croissance rapide, la rectitude de son tronc pouvant atteindre 40 à 50 mètres, ses qualités techniques reconnues en font une essence recherchée pour la construction.

Selon France douglas⁹, en dépit de sa jeunesse, et les effets de la tempête de 1999, le douglas français présentait en 2004, un volume sur pied d'environ 62 millions de m³ pour un accroissement biologique annuel supérieur à 5 millions de m³.

Le douglas est une essence qui s'adapte parfaitement au climat de type océanique, et tempéré, il à besoin d'une pluviométrie minimale de 700mm/an et d'une température moyenne annuelle comprise entre 8°C et 11°C (De Champs, 1995) pour son évolution. Cette exigence, en matière d'approvisionnement en eau, explique qu'il redoute beaucoup les climats trop secs. C'est une essence réputée calcifuge¹⁰, même si Mouchet et al. (2003) ont montré qu'il pouvait se développer sur des sols acides et profonds. Il supporte bien les sécheresses estivales à condition que les sols possèdent un bon stock en eau. En revanche, les sécheresses hivernales (février, mars) sont des périodes qui peuvent lui être fatale en périodes ensoleillées et de grand froid (manque d'eau dans le sol à cause des températures basses). Il a une particularité de supporter le vent quand il est jeune et à condition qu'il soit sur un bon sol et qu'il fasse l'objet d'une sylviculture suivie (éclaircie, coupes d'améliorations, dégagement). Il ne supporte pas la concurrence aussi bien dans le sol que dans l'atmosphère. C'est une essence qui à une forte capacité à la régénération naturelle. Il est préconisé comme essence pour faire face au changement climatique (Piermont, 2007). Ainsi, cela justifie de s'y intéresser, et c'est que nous allons analyser dans cette étude.

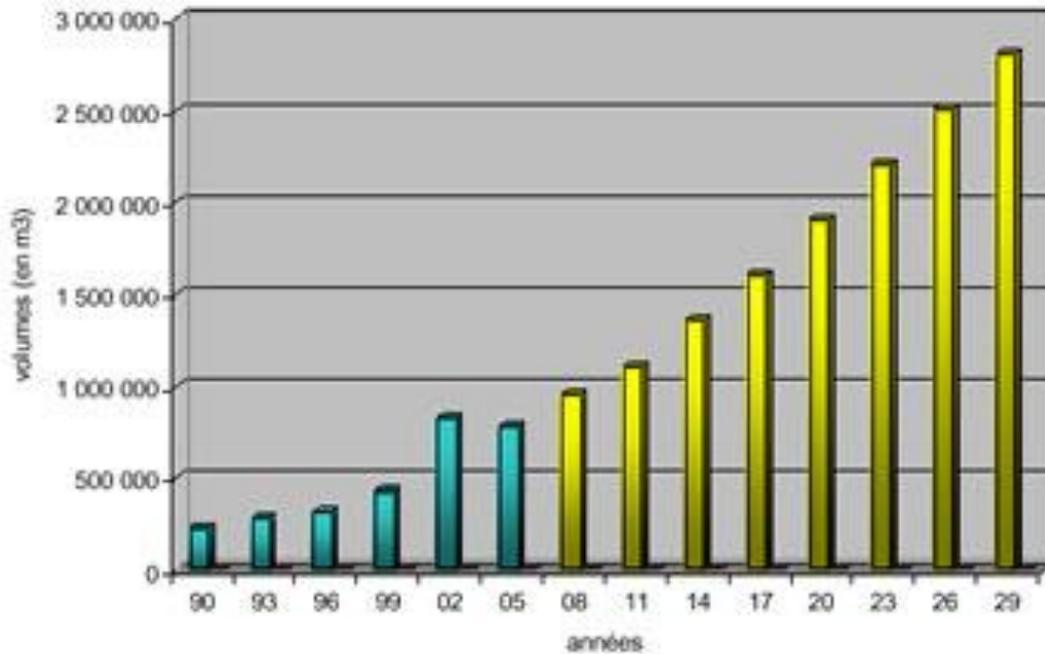
1.2. Les perspectives de récolte

Selon France Douglas, les efforts de reboisement réalisés depuis près de 40 ans et qui continue aujourd'hui devraient permettre à la France de disposer d'une grande quantité de l'essence qui égalerait les Sapins-épicéas et les Pins maritimes. En effet, l'IFN indique que dans 20 ans, la production forestière nationale en bois d'œuvre (douglas) sera de l'ordre de 6 millions de m³ par an à l'horizon 2030.

⁹ <http://www.france-douglas.com/>

¹⁰ Calcifuge (douglas) est une espèce végétale qui ne supporte pas les sols à calcaires

Figure 1: Perspective de production de sciage du massif de douglas jusqu'en 2030



Source : France-douglas.com

2. Présentation des données

Dans cette présentation, nous mettons l'accent sur les différentes données sylvicoles, ainsi que les probabilités de l'aléa climatique (sécheresse).

2.1. Données sylvicoles

Les données nécessaires à l'analyse de la rentabilité sont des valeurs monétaires associées aux recettes et coûts qui ont lieu lorsqu'il y a intervention sur le peuplement notamment lors d'éclaircie. Les recettes sont directement reliées aux volumes récoltés. Il faut noter que par faute de données disponibles pour des postes de dépenses (assurances, impôts et d'autres frais) ceux-ci ne sont pas pris en compte.

Deux scénarios sylvicoles appropriés pour la production du douglas ont été retenus dans le cadre de cette étude.

Le scénario long est proposé par Olivier Picard de l'Institut pour le Développement Forestier. Le scénario est basé sur les travaux de l'ex AFOCEL (Dechamps). Le peuplement est conduit à une révolution de 55 ans avec une plantation de 1 100 tiges. La première éclaircie est programmée à 22 ans et prélève 35% des tiges, la deuxième est effectuée à 29 ans et prélève 25% des tiges, la troisième effectuée à 42 ans prélève 20% des tiges, quatrième à 48 ans et 20% jusqu'à la coupe finale à 55 ans.

Tableau 5: Scénario sylvicole long

Age	Nombre de tige/ha	Nombre de tige prélevé /ha	Volume Total (m ³ /ha)	Prix (€/ m ³)	Recettes (€)	Coûts (€)
0	1 100					2 240
1						150
2						200
3						150
5						200
16						700
22	1 100	385	70	5	350	
29	715	180	67	8	536	
42	965	190	143	45	6 435	
48	345	70	90	55	4 950	
55	275	275	612	70	42 840	

Le scénario court (révolution de 40 ans) est proposé par la Société Forestière de la Caisse des Dépôts et Consignations. Ce scénario considère un peuplement de

Décourt dans le Nord-Est du Massif Central. Le peuplement a une densité de 1100 plants par hectare. La première éclaircie est effectuée à 20 ans et prélève 46% des tiges, la deuxième est effectuée à 25 ans et prélève 14% des tiges, la troisième est effectuée à 30 ans et prélève de 9%. Enfin, la coupe finale a lieu à 40 ans.

Tableau 6: Scénario sylvicole court

Age	Nombre de tige/ha	Nombre de tige prélevé/ha	Volume Total (m ³ /ha)	Prix (€/m ³)	Recettes (€)	Coûts (€)
0	1 100					1 915
1						350
2						200
4						200
20	1 100	508	135	26	3 510	
25	592	150	57	32	1 824	
30	442	100	59	42	2 478	
40	342	342	503	62	31 186	

2.2. Les données relatives à l'aléa sécheresse

Dans le cadre de cette étude, nous avons sollicité les données climatiques sur l'évolution future de la probabilité de sécheresse susceptible d'induire un dépérissement (avec mortalité) du douglas. Ces données sont issues des résultats acquis dans les deux projets ANR coordonnés par l'INRA : CLIMATOR (ANR-006-VULN-007) et DRYADE (ANR-006-VULN-004), ré-exploités dans le cadre du projet RMT Economie et risque par Nathalie Bréda.

La nature de l'aléa climatique est ici la sécheresse. Elle est un épisode de manque d'eau plus ou moins long mais suffisant pour que les sols et la flore soient affectés.

2.2.1. Faible fertilité / Bonne fertilité

L'humidité de l'air et du sol joue un rôle très important pour le douglas. Outre les températures et les précipitations, il est donc nécessaire de prendre en compte la disponibilité en eau du sol. Par conséquent, pour déterminer les indicateurs de sécheresses, deux hypothèses sont proposées : un sol à bonne fertilité avec une réserve utile en eau de 127 mm et un sol à faible fertilité hydrique avec une réserve utile de 97 mm.

2.2.2. Les probabilités

Pour un scénario d'émission de gaz à effet de serre (SRES, A1B), les probabilités varient selon le modèle climatique (ARPEGE, CERFACS) et la manière d'utiliser les données à l'échelle régionale (anomalie, run 1 ou run 2). En effet, le fait d'avoir assisté à la conférence « Que nous apprend la recherche sur la vulnérabilité des forêts au changement climatique ? » le 17 Novembre 2011 à l'Institut Technologique FCBA (Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement), Paris m'a permis de comprendre la signification des modèles climatiques.

Ainsi, le modèle ARPEGE, est un modèle de simulation du fonctionnement de l'atmosphère. Il est utilisé par Météo France pour prévoir le climat, d'ici la fin du siècle. Et le modèle du Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS), utilise des méthodes de calcul numérique innovantes et des super calculatrices hautes performances pour prédire le climat futur. Ces deux modèles réagissent bien à l'analyse issue de la famille des scénarios A1B du GIEC en proposant des climats possibles et compatibles.

Il faut rappeler que les scénarios du GIEC se répartissent en quatre familles (A1, A2, B1 et B2). La famille A1 fait l'hypothèse d'un monde caractérisé par une croissance économique très rapide, une augmentation de la population mondiale au milieu du siècle et l'adoption rapide des nouvelles technologies plus efficaces. A1 est considéré comme le scénario le plus contraignant pour les écosystèmes. Les familles (B1 et B2) entraînent relativement peu de modifications comparées à A2. En effet, vu

les différentes difficultés à parvenir à des accords mondiaux de réductions des gaz à effet de serre, le scénario A1 est celui qui semble le plus proche des concentrations observées aujourd’hui.

Ainsi, les paramètres de sortie du scénario ARPEGE–A1B, fournis au pas de temps journalier, ont permis de synthétiser trois périodes : une période de référence passé récent (1970 - 2006), un futur proche (autour de 2050) et un futur lointain (autour de 2100).

Tableau 7: Probabilité Bonne Fertilité Hydrique (RU = 127 mm)

	Anomalies A1B	CERFACS-run1-A1B	CERFACS-run2- A1B	CNRM-A1B
Passé récent	0,20	0,41	0,29	0,32
Futur proche	0,77	0,79	0,68	0,44
Futur lointain	0,90	0,93	0,68	0,71

Source : Livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010)

Tableau 8 : Probabilité Faible Fertilité Hydrique (RU = 97 mm)

	Anomalies A1B	CERFACS-run1-A1B	CERFACS-run2- A1B	CNRM-A1B
Passé récent	0,20	0,51	0,36	0,35
Futur proche	0,77	0,83	0,81	0,48
Futur lointain	0,93	0,93	0,75	0,71

Source : Livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010)

Il faut souligner qu’en matière de changement climatique, des incertitudes existent à toutes les étapes d’analyse des prévisions climatiques elles-mêmes, en passant par les impacts sur les activités humaines et sur les écosystèmes jusqu’aux coûts et avantages économiques. Ces incertitudes peuvent être dues au manque de données

ou à leur faible robustesse, à la compréhension limitée du problème en soi ou des enjeux liés au problème, à la nature même de la modélisation climatique ou économique et à l'imprévisibilité de certains phénomènes tels que le progrès technologique, pour ne citer qu'un exemple.

Ainsi, pour prendre en compte l'incertitude liée aux modèles climatiques, nous utilisons dans cette étude le maximum et le minimum des probabilités pour chaque fertilité (bonne, faible) du sol.

Après discussion avec Nathalie Bréda, nous avons choisi de ne pas considérer l'incertitude liée aux scénarios car il existe peu de différence en termes de probabilités comme l'attestent les tableaux ci-dessous.

Bonne Fertilité Hydrique (RU = 127 mm)

	CNRM- A1B	CNRM- A2	CNRM- B1
Passé récent	0,32	0,32	0,32
Futur proche	0,44	0,27	0,43
Futur lointain	0,71	0,69	0,68

Source : Nathalie Bréda

Faible Fertilité Hydrique (RU = 97 mm)

	CNRM- A1B	CNRM- A2	CNRM- B1
Passé récent	0,35	0,35	0,35
Futur proche	0,48	0,29	0,55
Futur lointain	0,71	0,73	0,83

Source : Nathalie Bréda

2.3. Les méthodes et concepts utilisés

Dans cette partie on explique la gestion forestière au sens économique ainsi que les différents critères de rentabilité en situation de risque et d'incertitude.

2.3.1. Les origines de l'économie forestière

La modélisation économique en foresterie repose sur le cadre établi par Martin Faustmann en 1848. Son analyse, visant à déterminer la valeur des peuplements forestiers, a permis de clarifier considérablement le débat en matière de gestion forestière.

Le modèle : l'objectif d'un gestionnaire forestier est de choisir une durée de révolution N qui va lui permettre de maximiser le bénéfice de son activité économique :

$$Y_b(N) = [p_b(N) * v(N) * e^{-rN} - C_0] * (1 - e^{-rN})^{-1} \quad (1)$$

Y_b représente la valeur du fonds forestier et b correspond à la valeur de production de bois ; $v(N)$ est le volume de bois à l'instant N ; N correspond à l'âge de coupe et C_0 les coûts de plantation. Le prix du bois p_b ne dépend pas forcément de l'âge d'exploitabilité des arbres. Par contre l'âge influence la qualité du bois et donc le prix. Toutes ces valeurs sont actualisées au taux d'actualisation noté r sur une infinité de rotations.

Pour déterminer la durée de révolution optimale¹¹ on dérive l'équation (1) par rapport au temps, et on annule cette dérivée :

$$p'_b(N) * v(N) + p_b(N) * v'(N) = r * Y_b(N) + r * p_b(N) * v(N) \quad (2)$$

La durée de révolution est optimale lorsque le bénéfice marginal du maintien des arbres sur pied est égal au coût marginal du maintien des arbres sur pied (Peyron, 1998). Ainsi Cette dérivée peut être expliquée en deux parties. La seconde partie de l'équation (2) correspond au bénéfice marginal. En effet, le bénéfice marginal obtenu est constitués de deux effets : un effet quantité (l'évolution du volume de bois) et un effet qualité (évolution du prix). La première partie de l'équation (2) correspond au coût marginal du fait d'attendre avant la révolution. Ce coût marginal est constitué de deux aspects : d'une part, on a le bénéfice sur la valeur des arbres qui correspond ainsi au gain que le propriétaire forestier obtiendrait en se rendant sur un marché

¹¹ Ce point s'inspire pour partie de cours préparés par Franck Lecocq (CIRED). Toute erreur ou omission est entièrement du ressort du présent auteur.

financier avec un taux d'actualisation r , d'autre part, on a le bénéfice sur la valeur du fonds forestier, cette somme correspond au montant que le propriétaire pourrait gagner en vendant sa parcelle, en commençant une nouvelle rotation.

2.3.2. Taux d'actualisation

Pour bien évaluer la valeur et les coûts occasionnés par la gestion d'un peuplement forestier, il est indispensable d'avoir des critères économiques qui tiennent compte de la notion du temps.

Le temps est lié à l'actualisation dans les projets d'investissement de longue durée. Et l'actualisation est une opération mathématique qui permet de comparer des valeurs économique qui s'échelonnent dans le temps : il s'agit donc de ramener la valeur future d'un bien, d'une dépense à une valeur actuelle nette. En effet, le taux d'actualisation est un taux de substitution entre le futur et le présent, il traduit la valeur du temps. Ainsi en calcul économique forestière le taux d'actualisation est fondamental, il se détermine comme suit :

- La valeur actuelle d'un bien qui vaudra V dans un an est $\frac{V}{1+r}$; d'une façon générale, la valeur actuelle d'un bien future en fonction de sa valeur dans n année est. $\frac{V}{(1+r)^n}$; r est appelé taux d'actualisation qui est généralement exprimé en %, sa valeur est souvent comprise entre 0 et 10%.

Il faut noter que la fixation du taux d'actualisation dépend de la durée et de la nature du projet. Ainsi le Commissariat au Plan préconise par exemple l'utilisation d'un taux d'actualisation avoisinant les 4% pour des projets d'une durée total inférieure à 30 ans et un taux de 3% pour les projets supérieurs à 30 ans. En économie forestière comme la durée des révolutions est longue, on rencontre souvent des taux qui sont entre 2% et 5%. Les taux d'actualisations ont pour effet d'accorder un plus grand poids aux impacts futurs et ce phénomène risque d'avoir des conséquences particulièrement graves en ce qui concerne les impacts environnementaux tels que le réchauffement planétaire et la perte de la biodiversité (Bonhême et al, 2010).

2.4. Cadre d'analyse et outils

Le calcul économique est une technique qui permet de comparer les différents bénéfices que l'on peut tirer d'un projet d'investissement. En gestion forestière, le calcul économique est un outil très important car il permet de faire des arbitrages sur des projets d'investissements sylvicoles dont les effets de certains se manifestent à court terme, d'autres à long terme. Il est donc indispensable de sélectionner et hiérarchiser les meilleurs projets sylvicoles. Au vue de ces éléments, le calcul économique apparaît donc comme un instrument essentiel à utiliser pour évaluer et comparer les projets sylvicoles.

- Le critère Analyse coûts-bénéfice (ACB)

L'analyse coûts-bénéfice consiste à mesurer et comparer l'accroissement des bénéfices et la réduction coûts du bien être social induits par une action ou une politique particulière (Pearce et al. 2006). Ainsi un projet satisfait au critère coûts-bénéfices si leurs bénéfices sont supérieurs à leurs coûts. En général l'ACB porte sur des projets spécifiques mais qui peut être appliqué à d'autres domaines comme les problèmes environnementaux. Et elle est préconisée dans l'analyse des options d'adaptation (Hallegate et al. 2010).

- La valeur actuelle nette ou bénéfice actualisée :

Evaluer la rentabilité d'un investissement revient à comparer les bénéfices retirés de cet investissement avec un scénario de référence. Et pour comparer ces bénéfices on utilise le critère de la valeur actualisée nette (VAN) encore appelée critère du bénéfice actualisé (BA).

Le critère de la VAN ou BA consiste à calculer la somme des recettes et des coûts actualisés sur toute la durée du projet. Soit la formule suivante :

$$VAN = BA = \sum_{i=0}^N \frac{R_i - D_i}{(1 + r)^n}$$

Le critère de décision est :

- VAN ≥ 0 , on réalise l'investissement productif car celui-ci est amorti et rentabilisé à un taux suffisant (au moins au taux du marché).
- VAN < 0 , on va sur le marché financier qui rémunère alors plus que l'investissement.

Dans les projets sylvicoles, l'actualisation des dépenses et recettes est essentiel, car les premiers bénéfiques n'apparaissent qu'après une période donnée.

Le taux de rendement Interne : ce taux est une variante de la VAN. Le TRI est le taux ρ telle que la VAN soit nulle :

$$\sum_{i=0}^N \frac{R_i - D_i}{(1 + \rho)^n} = 0$$

Le critère de décision est :

- $\rho \geq r$, on réalise l'investissement productif.
- $\rho < r$, on va sur le marché financier.

- **Critère du Bénéfice Actualisé en Séquence Infinie (BASI)**

Le BASI permet de comparer deux projets à durée différente. C'est le critère le plus utilisé par les gestionnaires forestiers. Ainsi, le fait d'effectuer le calcul à l'infini suppose que le scénario du projet se répète indéfiniment. Pour calculer le BASI d'un peuplement forestier, il faut considérer qu'à chaque période n de révolution, le peuplement suit le même itinéraire qu'à la révolution précédente avec les différents coûts et recettes associés aux mêmes dates. La séquence de durée n se répète N fois et tend vers l'infini. Cette formule est appelée critère de Faustmann et s'écrit :

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

Le Land Expectation Value (LEV) que nous allons utiliser tout au long de l'application à la même signification que le BASI. Le LEV est la valeur actuelle, par unité de surface, des coûts et des revenus projetés d'une série infinie de rotation.

Dans ce cadre, on va donc déterminer la valeur actuelle nette (VAN) ou Bénéfice actuelle (BA), qui vont nous permettre de calculer les Land Expectation Value (LEV) des deux scénarios de notre étude. Après la détermination du LEV on va comparer les différentes stratégies en fonction de leur LEV.

3. Analyse des résultats

Dans ce point nous expliquons les différents résultats que nous avons obtenus ainsi que la méthodologie utilisée.

3.1. Calcul de la valeur actuelle nette du scénario long et du scénario court

Dans les 2 tableaux suivant nous calculons la Valeur actuelle nette, et le taux interne de rentabilité des 2 scénarios en supposant un taux d'actualisation de 2%.

Tableau 9: Rentabilité et rendements du scénario long (Annexe 1)

Opérations (âge)	Coûts et recettes(€)	VAN (€/ha)
Coûts initial	- 2 240	- 2 240
Entretien (1)	- 150	- 147,05
Entretien (2)	- 200	- 192,23
Entretien (3)	- 150	- 141,34
Elagage (5)	- 200	- 181,14
Solde (16)	- 700	- 509,91
Papeterie (22)	350	226,39
Papeterie palette (29)	480	301,82
Palette (42)	6 435	2801,18
Palette (48)	4 950	1913,36

Coupe finale (55)	42 840	14415,84
Total = VAN (RL*) =		16246,90 €/ha
TRI : $\sum_{i=0}^{55} \frac{R_i - D_i}{(1 + \rho)^{55}} = 0$ TRI = 6%		

*VAN révolution longue

Tableau 10: Rentabilité et rendements du scénario court (Annexe 2)

Opérations (âge)	Coûts et recettes (€)	VAN (€/ha)
Coûts initial	- 1 915	-1915
Entretien (1)	- 350	-343,13
Entretien (2)	- 200	-192,23
Entretien (4)	- 200	-184,76
Papeterie (20)	3 510	2362,12
Papeterie palette (25)	1 824	1111,78
Palette (30)	2 478	1368,03
Coupe finale (40)	31 186	14123,84
Total = VAN (RC*) =		16 330,64 €/ha
TRI : $\sum_{i=0}^{40} \frac{R_i - D_i}{(1 + \rho)^{40}} = 0$ TRI = 8%		

*VAN révolution courte

L'analyse des tableaux 9 et 10 permet d'affirmer qu'en utilisant les hypothèses qui sont incluses aux dépenses et recettes avec un taux d'actualisation de 2%, toutes choses égales par ailleurs, le scénario court est très légèrement supérieur au scénario long en terme de rentabilité. Bien que la différence en termes de la VAN soit faible entre les deux scénarios, le TRI est nettement plus important pour le scénario court (8%) et cela montre que ce scénario représente un investissement plus avantageux.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer que le scénario court soit plus rentable que le scénario long. Le principal facteur est certainement lié au moment des entrées et des sorties d'argent dans le temps, jumelé à la rentabilité de la première intervention. Le processus d'actualisation fait en sorte que les premières entrées et sorties de fonds occupent un poids plus important dans le calcul de la VAN, tandis que plus on avance dans le temps, moins les entrées et sorties de fonds jouent un rôle important. Par ailleurs, en comparant les coûts d'entretiens pour la première intervention, on remarque que pour le même nombre de tiges les coûts initiaux alloués pour chaque scénario sont différents. Donc on peut dire qu'en réalisant peu d'investissement dans le scénario court, le propriétaire gagne plus que dans le scénario long avec plus d'investissement.

En observant les objectifs de production des arbres, le scénario court est associé à une productivité de 18,85 m³/ha/an par rapport au scénario long qui est de 17,85 m³/ha/an (la productivité est obtenue en calculant la moyenne du volume totale prélevé). Donc il apparaît, qu'il est souhaitable économiquement d'avoir une révolution courte.

Dans l'étape suivante, nous exposons le problème du propriétaire forestier et déterminons les différentes solutions possibles après la coupe finale pour lui permettre de prendre une décision quand à la gestion de son peuplement de douglas.

3.2. Données du problème

Considérons un propriétaire forestier gérant un peuplement de douglas en révolution longue. Il vient de réaliser la coupe finale et se trouve face à deux scénarios :

- Replanter en révolution longue à 55 ans et passer en révolution courte à la rotation suivante (scénario 1) ;
- Planter en révolution courte à 40 ans et rester en révolution courte pour les rotations suivantes (scénario 2).

Nous examinons deux cas possibles : un cas de référence et un cas avec risque.

3.2.1. Cas de référence

Ainsi, pour calculer le LEV des différents scénarios on va utiliser la valeur actuelle nette du scénario 1 et la valeur actuelle nette du scénario 2.

LEV (scénario 1) :

$$LEV(SC1) = VAN(RL) + \frac{LEV(SC2)}{(1+r)^{55}} = 16246,908 + \frac{29849}{2,971} = 26291$$

$$LEV(SC1) = 26291\text{€/ha}$$

LEV (scénario 2) :

$$LEV(SC2) = VAN(RC) + \frac{VAN(RC)}{(1+r)^{40}} * \frac{(1+r)^{40}}{(1+r)^{40} - 1}$$

$$LEV(SC2) = VAN(RC) + \frac{VAN(RC)}{(1+r)^{40} - 1} = 16330,6457 + \frac{16330,6457}{1,2080} = 29848,94$$

$$LEV(SC2) = 29849\text{€/ha}$$

Donc, comme le LEV (SC 2) est supérieur au LEV (SC 1), la meilleure stratégie serait de passer à une révolution à 40 ans.

Ainsi, dans la perspective de l'adaptation de la forêt au changement climatique, la notion de risque doit être comprise par le propriétaire forestier comme une relation entre la vulnérabilité et les impacts potentiels de la sécheresse sur le douglas.

Donc on va introduire de la complexité dans notre problème en considérant des probabilités de sécheresse à 50 et 100 ans et deux niveaux de fertilité, faible et bonne. Cela nous permet de déterminer 8 stratégies et 2 arbres de décision.

3.2.2. Cas avec risque

Nous faisons l'hypothèse que le propriétaire forestier est neutre vis-à-vis du risque, les critères retenus sont la maximisation de l'espérance mathématique des LEV (stratégies) et l'analyse de la sensibilité.

Avant de calculer les LEV il convient de s'interroger sur le montant des probabilités et sur la définition des stratégies à retenir.

- **Probabilités**

Partant des tableaux 7 et 8, nous ne retenons que les probabilités maximale et minimale pour chaque horizon temporel. Nous obtenons alors les tableaux suivants :

Bonne Fertilité

Année	PH	PL
2050	0,79	0,44
2100	0,93	0,68
Seuil	0,41	0,32

Faible Fertilité

Année	PH	PL
2050	0,83	0,48
2100	0,93	0,71
Seuil	0,51	0,35

- PH correspond à la probabilité maximale qu'il y ait au moins une sécheresse avant 2050 ou avant 2100.
- PL correspond à la probabilité minimale qu'il n'y ait une sécheresse avant 2050 ou avant 2100.
- Seuil correspond à la probabilité dans le passé récent.

Donc P est la probabilité d'avoir une sécheresse. Elle permet de mesurer le risque pris au moment de la prise de décision par le gestionnaire de gérer son peuplement en 40 ou 55 ans.

- **Les stratégies :**

Les stratégies pour la bonne fertilité du sol :

- Stratégie 1 : la probabilité PH =79% est supérieure au seuil de 41%, donc le risque de sécheresse tend à s'intensifier à l'horizon 2050. En réaction à cela, le propriétaire réduit sa période de rotation immédiatement (scénario2). La probabilité (1-PH) = 21% est inférieure au seuil de 41% donc le propriétaire conserve sa gestion actuelle encore une rotation (scénario 1).

- Stratégie 2 : la probabilité $PL = 44\%$ est supérieure au seuil de 32% , donc le risque sécheresse s'intensifie, et le propriétaire réduit sa période de rotation immédiatement (scénario 2). La probabilité $(1-PL) = 56\%$ est elle aussi supérieure au seuil de 32% donc, dans cet état du monde également, le propriétaire opte pour une rotation courte immédiatement (scénario 2). On a donc une probabilité de 1 de se retrouver dans le scénario 2.
- Stratégie 3 : la probabilité $PH = 93\%$ est supérieure au seuil de 41% , donc le risque sécheresse tend à s'intensifier à l'horizon 2050. En réaction à cela, le propriétaire réduit sa période de rotation immédiatement (scénario 2). La probabilité $(1-PH) = 17\%$ est inférieure au seuil de 41% donc le propriétaire conserve sa gestion actuelle encore une rotation (scénario 1).
- Stratégie 4 : la probabilité $PL = 68\%$ est supérieure au seuil de 32% , donc le risque sécheresse s'intensifie, et le propriétaire réduit sa période de rotation immédiatement (scénario 2). La probabilité $(1-PL) = 32\%$ est égale au seuil de 32% donc, dans cet état du monde également, le propriétaire opte pour une rotation courte immédiatement (scénario 2). On a donc une chance de se retrouver dans le scénario 2.

Les stratégies pour la faible fertilité du sol :

- Stratégie 5 : la probabilité $PH = 83\%$ est supérieure au seuil de 51% , donc le risque sécheresse tend à s'intensifier à l'horizon 2050. En revanche à cela, le propriétaire réduit sa période de rotation immédiatement (scénario 2). La probabilité $(1-PH) = 17\%$ est inférieure au seuil de 51% donc le propriétaire conserve sa gestion actuelle encore une rotation (scénario 1).
- Stratégie 6 : la probabilité $PL = 48\%$ est supérieure au seuil de 35% , donc le risque sécheresse s'intensifie, et le propriétaire réduit sa période de rotation immédiatement (scénario 2). La probabilité $(1-PL) = 52\%$ est elle aussi supérieure au seuil de 35% donc, dans cet état du monde, le propriétaire opte pour une rotation courte immédiatement. On a donc une chance de se retrouver dans le scénario 2.
- Stratégie 7 : la probabilité $PH = 93\%$ est supérieure au seuil de 41% , donc le risque sécheresse tend à s'intensifier à l'horizon 2050. En réaction à cela, le

propriétaire réduit sa période de rotation immédiatement (scénario 2). La probabilité $(1-PH) = 17\%$ est inférieure au seuil de 41% donc le propriétaire conserve sa gestion actuelle encore une rotation (scénario 1).

- Stratégie 8: la probabilité $PL = 71\%$ qui est supérieure au seuil de 35%, donc le risque sécheresse s'intensifie, et le propriétaire réduit sa période de rotation immédiatement (scénario 2). La probabilité $(1-PL) = 29\%$ qui est inférieure au seuil de 35%, le propriétaire va opter pour le scénario 1. En effet dans cette stratégie 8, le propriétaire va faire un arbitrage entre le scénario 1 et le scénario 2.

- Les arbres de décision

Un arbre de décision est une méthode graphique pour analyser des décisions avec risque, des modèles dans lesquels les probabilités associées aux différents états de la nature sont spécifiées. Pour être plus précis, les arbres de décision ont été conçus pour régler les problèmes faisant intervenir une séquence de décisions et événements successifs. Ainsi, de gauche à droite, à chaque nœud d'événement, on a calculé le maximum de l'espérance mathématique des stratégies.

Figure 3 : Arbre de décision bonne fertilité du sol (BF)

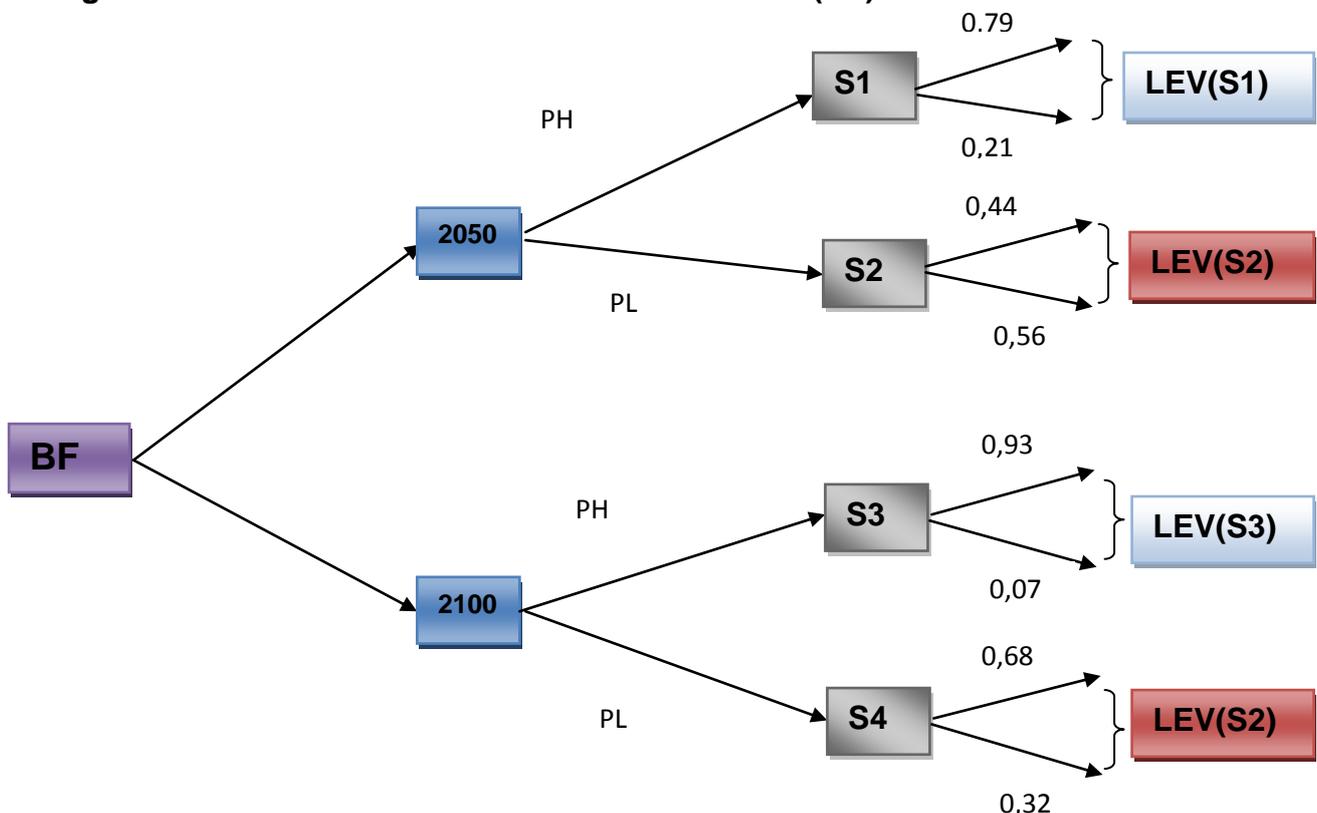
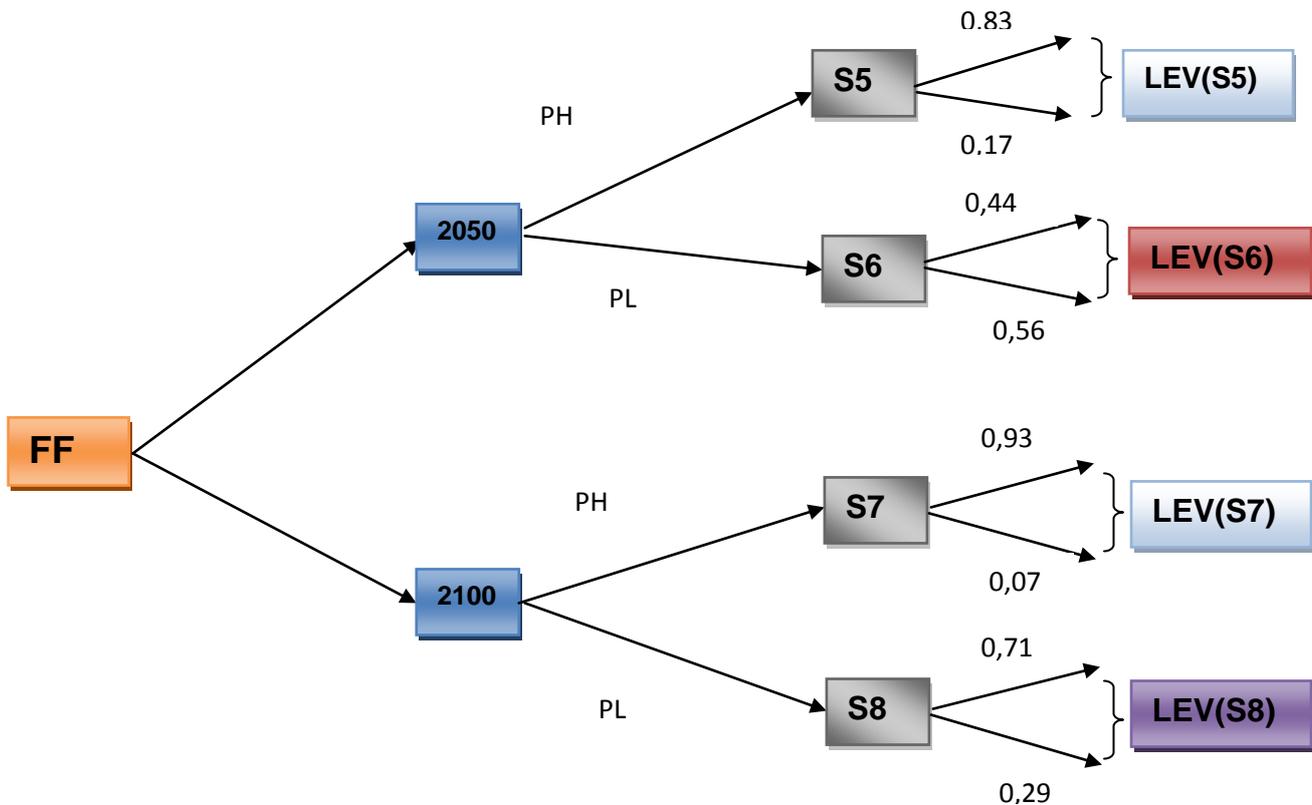


Figure 4 : Arbre de décision faible fertilité du sol (FF)



A partir des probabilités fixées et en utilisant les résultats de calcul obtenus pour chaque scénario (LEV (SC1), LEV (SC2)), nous allons calculer l'espérance mathématique des stratégies.

- L'espérance mathématique

Une méthode de prise en compte du risque est l'utilisation de l'espérance mathématique. Il s'agit dans ce cas de calculer la valeur moyenne des impacts anticipés des changements climatiques à partir de la distribution de probabilités de l'ensemble des scénarios. Ainsi, la valeur attendue de chaque stratégie équivaut à la moyenne des avantages nets ou des impacts évités par la stratégie secondaire à chaque scénario, pondérée par la probabilité que le scénario se réalise. La stratégie choisit serait alors celle qui correspond à la valeur maximale attendue.

$$LEV(Stratégies) = p \left[VAN(RC) + \frac{VAN(RC)}{(1+r)^{40} - 1} \right] + (1-p) \left[VAN(RL) + \frac{LEV(SC2)}{(1+r)^{55}} \right]$$

$$LEV(Stratégies) = p(LEV(SC2)) + (1-p)(LEV(SC1))$$

Pour le LEV stratégie 1, on a :

$$LEV(S1) = 0,79(29849) + (1 - 0,79)(26291) = 29101\text{€/ha}$$

$$LEV(S1) = 29101\text{€/ha}$$

Avec une probabilité de 0,79, la sécheresse a une forte chance de survenir avant 2050 et donc le seul moyen que le propriétaire a de se prémunir est de passer en rotation courte, donc il est dans le scénario 2. Avec une probabilité de 0,21, la sécheresse ne se produit pas car 0,21 est inférieure au seuil de 0,41 donc il reste en rotation longue encore une fois, il est dans le scénario 1.

LEV stratégie 2 : Avec une probabilité de 0,44, la sécheresse se produit, donc le propriétaire pour s'assurer passe en rotation courte (scénario 2). Avec une probabilité de 0,56 la sécheresse se produit aussi car 0,56 est supérieure au seuil de probabilité de 0,32 donc pour s'assurer il passe aussi en rotation courte. Ainsi dans cette stratégie 2, il est certain que la sécheresse va se produire avant 2050 donc il est dans le scénario 2 avec certitude : **LEV (S2) = LEV (SC 2) = 29848 €/ha.**

$$LEV(S2) = 29848\text{€/ha}$$

Le reste du calcul est identique pour les autres stratégies sauf la stratégie 8 qui à une certaine particularité. Donc c'est la seule stratégie avec une probabilité basse (PL) qui à une probabilité (1-PL) inférieure au seuil.

Calcul du LEV de la stratégie 8 :

$$LEV(S8) = 0,71(29849) + (1 - 0,71)(26291) = 28817\text{€/ha}$$

$$LEV(S8) = 28817\text{€/ha}$$

Avec une probabilité de 0,71, la sécheresse se produit, mais le niveau de risque est faible. Et avec une probabilité de 0,29, la sécheresse ne se produit pas car 0,29 est inférieure au seuil de 0,35, donc le propriétaire peut soit resté en rotation courte, soit en rotation longue. Vu, l'avantage financier il serait préférable de rester en rotation courte.

Dans le tableau suivant nous résumons les LEV des stratégies :

Tableau 11: LEV des différentes stratégies (Annexe 3)

Stratégies	Probabilités	P (LEV(SC2))	(1-P) LEV(SC1)	LEV(Stratégies)
1	PH=0,79 et 1-PH=0,21	23580,66	5521,15	29101,82
2	0,44	LEV (scénario 2)		29848
3	0,93	27759,52	1840,38	29599,90
4	0,68	LEV (scénario 2)		29848
5	0,83	24774,62	4469,50	29244,13
6	0,48	LEV (scénario 2)		29848
7	0,93	27759,52	1840,38	29599,90
8	0,71	21192,75	7624,44	28817,20

Le constat général qui prédomine est que la LEV est la plus élevée quand la sécheresse est certaine de se produire (stratégies 2, 4, 6), c'est-à-dire quand le propriétaire passe immédiatement en rotation courte et reste en rotation courte pour la suite. Par contre le LEV (stratégie 8) est particulier, car malgré que le niveau de risque soit faible le propriétaire à le choix entre passer en rotation courte ou rester en rotation longue. En comparant la stratégie 8 avec les stratégies (2, 4, 6) on s'aperçoit qu'il serait préférable d'un point de vue financier pour le propriétaire de passer en rotation courte dès maintenant.

Ici nous avons montré que le propriétaire forestier, en présence de risque sécheresse, a intérêt à choisir et à maintenir la période de rotation à 40 ans. Ceci est conforme aux résultats de Reed (1984). Il démontre qu'un risque de destruction (dans son cas le risque concerne les incendies de forêts) de 1% par exemple peut se traduire par une diminution de la durée des révolutions.

En effet, malgré ces résultats qui penchent en faveur d'une diminution des révolutions, il faut tenir compte de la variabilité des prix du bois parce qu'un

propriétaire forestier aura tout intérêt à retarder la vente de sa parcelle si les prix des bois s'avèrent être conjoncturellement bas (par exemple après une sécheresse importante ce qui n'aurait pas forcément endommagé sa forêt).

Une autre approche de prise en compte du risque est l'analyse de sensibilité.

- **Analyse de sensibilité**

L'analyse de sensibilité a l'avantage de ne pas requérir que les probabilités soient connues pour chaque scénario. Elle s'effectue par l'augmentation graduelle d'un paramètre économique (taux d'actualisation) à l'intérieur de limites réalistes afin de vérifier dans quelle mesure le résultat d'une stratégie peut être modifié.

Jusqu'ici, tous les calculs ont été effectués avec un taux d'actualisation de 2%, en prenant un taux ($r = 1\%$ et $r = 3\%$) quelles sont les modifications qui apparaissent ?

Tableau 12: Variation du taux d'actualisation sur le LEV

Stratégies	Probabilités	LEV ($r= 1\%$)	LEV ($r=3\%$)
1	PH= 0,79 et 1-PH = 0,21	48745,72	22989,53
2	0,44	49735,95	23550,08
3	0,93	49405,88	23363,23
4	0,68	49735,95	23550,08
5	0,83	48934,33	23096,30
6	0,48	49735,95	23550,08
7	0,93	49405,88	23363,23
8	0,71	48368,49	22775,99

On s'aperçoit que même en faisant varier le taux d'actualisation, la valeur de la stratégie (2, 4, 6) qui est égale au LEV (SC2) respectivement (49735,95 €/ha et

23550,08 €/ha) est plus rentable financièrement pour le propriétaire forestier. Donc de planter en révolution courte à 40 ans et rester en révolution courte pour les rotations suivantes.

Après avoir examiné les deux cas (simple et risqué) regardons ce qui va se passer si on ajoutant des coûts pour le sol à faible fertilité.

3.2.3. Faible fertilité avec un coût supplémentaire

Sachant que le risque climatique va devenir important, l'un des scénarios serait de passer en révolution courte comme on vient de le voir. Cependant cette stratégie ne peut être viable du point de vue de la fertilité du sol, en l'occurrence dans le cas de sol de faible fertilité. Ainsi, Nathalie Bréda en a proposé d'introduire dans cet itinéraire un amendement de recharge à chaque nouvelle plantation (tous les 40 ans). Le coût associé à cette situation est compris entre 150 à 250 €/ha. Pour le coût de fertilisation nous utilisons le montant maximal car nous supposons que le coût de fertilisation pour la faible fertilité peut être élevé.

Calcul des LEV (scénarios) avec le coût de fertilisation (CF = 250 €/ha).

- **LEV (scénario 1) :**

$$LEV(SC1) = VAN(RL) + \frac{LEV(SC2)}{(1+r)^{55}} = 16247 + \frac{29642}{2.971} = 26222$$

$$LEV(SC1) = 26222\text{€/ha}$$

- **LEV (scénario 2) :**

$$LEV(SC2) = VAN(RC) + \frac{VAN(RC) - CF}{(1+r)^{40}} * \frac{(1+r)^{40}}{(1+r)^{40} - 1}$$

$$LEV(SC2) = VAN(RC) + \frac{VAN(RC) - CF}{(1+r)^{40} - 1} = 16331 + \frac{16331 - 250}{1,2080} = 29642$$

$$LEV(SC2) = 29642\text{€/ha}$$

Calcul des LEV (stratégies) :

$$LEV(\text{Stratégies}) = p(LEV(SC2)) + (1 - p)(LEV(SC1))$$

Ainsi, pour la stratégie 5 on a :

$$LEV(S5) = 0,83 * 29642 + (1 - 0,83) * 26222$$

$$LEV(S5) = 29061\text{€}/\text{ha}$$

Avec une probabilité de 0,83, la sécheresse a une forte chance de survenir avant 2050 et donc le seul moyen que le propriétaire a de se prémunir est de passer en rotation courte, donc il est dans le scénario 2. Avec une probabilité de 0,17, la sécheresse ne se produit pas car 0,17 est inférieure au seuil de 0,51 donc il reste en rotation longue encore une fois, il est dans le scénario 1.

Pour le **LEV(S6)** : avec une probabilité de 0,48, la sécheresse se produit, donc le propriétaire pour s'assurer passe en rotation courte (scénario 2). Avec une probabilité de 0,52 la sécheresse se produit aussi car 0,52 est supérieur au seuil de probabilité de 0,35 donc pour s'assurer il passe aussi en rotation courte. Ainsi dans cette stratégie 2, il est certain que la sécheresse va se produire avant 2050 donc il est dans le scénario 2 avec certitude. **LEV (S6) = LEV (SC 2) = 29642 €/ha.**

$$LEV(S6) = 29642\text{€}/\text{ha}$$

Pour le LEV (Stratégie 7) c'est le même raisonnement que pour le LEV (stratégie 5).

On obtient :

$$LEV(S7) = 29403\text{€}/\text{ha}$$

La stratégie 8 on a :

$$LEV(S8) = 0,71 * 29642 + (1 - 0,71) * 26222$$

$$LEV(S8) = 28650\text{€}/\text{ha}$$

Avec une probabilité de 0,71, la sécheresse se produit, mais le niveau de risque est faible. Et avec une probabilité de 0,29, la sécheresse ne se produit pas car 0,29 est inférieure au seuil de 0,35, donc le propriétaire peut soit resté en rotation courte, soit en rotation longue. Vu l'avantage financier il aurait intérêt à rester en rotation courte.

Tableau 13: LEV stratégies en faible fertilité avec un coût de fertilisation

Stratégies	Probabilité	PH (LEV(SC2))	(1-P)(LEV(SC1))	LEV(Stratégies)
5	PH=0,83 ou 1-PH=0,17	24603	4458	29061
6	0,48	LEV (SC 2)		29642
7	0,93	27567	1836	29403
8	0,71	21046	7604	28650

Les résultats démontrent que malgré un coût supplémentaire l'écart de rentabilité entre la faible fertilité avec ou sans coût n'est pas grande. En comparant aussi les résultats avec une bonne fertilité du sol la tendance est la même.

Discussion et Conclusion

L'évaluation des stratégies d'adaptation de la forêt face au changement climatique est un domaine en développement et fait l'objet d'une littérature croissante. Cela peut s'expliquer peut être par le progrès dans la mise en place des modèles climatiques et sur le caractère irréversible du changement climatique, même s'il existe une incertitude sur l'ampleur du changement.

Ainsi, un des apports de mon travail est l'application d'une telle démarche qui va contribuer à développer et à utiliser les outils de l'analyse économique dans un contexte où les enjeux financiers et environnementaux sont importants pour le long terme.

Cette étude à permis d'élaborer une approche permettant de comparer deux scénarios sylvicole d'un peuplement douglas. L'analyse de la valeur actuelle nette des deux scénarios à permis de constater que de façon générale, le scénario court est légèrement plus rentable financièrement pour le propriétaire forestier que le scénario long. La comparaison des Land Expectation Value des deux scénarios en fonction des hypothèses posées ont montré que la révolution courte (40 ans) est plus rentable financièrement pour le propriétaire forestier que la révolution longue (55 ans).

Les résultats fournis par cette étude ne couvrent qu'un nombre très limité de scénario sylvicoles et doivent être interprété avec prudence. Ils constituent cependant une première étape intéressante offrant de nouvelles pistes de recherche.

Dans une perspective de gestion du peuplement face au changement climatique, cette étude pourrait être approfondie de plusieurs façons. Tout d'abord, la théorie des options pourrait permettre d'analyser l'interaction entre l'irréversibilité de l'investissement en foresterie et l'incertitude. Plus précisément, analyser la décision d'investir afin de réduire les incertitudes (économique et environnementale). Cette analyse peut se faire par exemple en temps continu afin de permettre un traitement complet des aspects dynamiques du problème. De plus comme l'information évolue de manière continue et que les variables d'intérêt évoluent aussi, une modélisation en temps continu serait intéressante à voire.

Ce travail ouvre la porte aussi à une autre extension qui nécessiterait de plus amples travaux. Notamment en regardant l'impact de l'aversion au risque du propriétaire forestier sur ses décisions, sur sa fonction d'utilité qui lui permettrait de réaliser un choix de gestion avec un risque mesuré. Enfin de mener une réflexion sur l'aléa sécheresse en tenant compte de l'impact de l'aléa sur le chiffre d'affaire, en utilisant par exemple les modèles Bioéconomiques¹².

¹² Les principes de la bioéconomie sont fondés sur l'observation d'un organisme vivant et de ses interactions avec le milieu environnant, observation transposable à notre société tout entière et à ses fonctionnements.

BIBLIOGRAPHIE

Bombraut, S. Vallée, B., 2004. "Conséquences de la canicule de l'été 2003 sur les peuplements de Douglas". Forêt entreprise 159.

Bonhême, I, Miller, C., 2010. "Programme de recherche : Biodiversité et Gestion Forestière". Résultats scientifiques et acquis pour les gestionnaires et décideurs. Projets 2005-2009. Paris. GIP Ecofor-MEEDDM, 128p.

Bréda, N., Granier, A., Aussenac, G. 2004. "La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse éco-physiologique et influence sur les arbres forestiers". Revue Forestière Française. LVI 2: 109-131.

Bréda, N. 2008. "Sécheresse et forêt : les arbres comme détecteurs de sécheresse". Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC. Paris. Pp. 33-40.

Costa, S., Lecocq, F., Brunette, M. 2011. "Economics of Species Change under Risk of Climate Change A Sensitivity and (Quasi-) Option Value Analysis". Miméo LEF.

Chenost, C. 2007. "Vers une gestion intégrée des forêts et des produits bois pour la lutte contre le changement climatique". Thèse Professionnelle. Institut Supérieur International de Gestion de l'Environnement.

Deheza, M., Bellassen, V. 2010. "Valorisation carbone de la filière forêt bois en France". Etude Climat n°20 - CDC Climat Recherche - ISSN 210 1-4663.

Département de la Santé des Forêts (DSF) Massif Central 2004. "L'état de la santé des forêts du massif central (Auvergne, Limousin, Bourgogne)". Informations techniques 56.

Flot, J.L. 2005. "Dommages causés aux plantations forestières par la sécheresse et la canicule de 2003". En ligne [http : www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/2004_plantations.pdf](http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/2004_plantations.pdf).

Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC). 2007. "Résumé à l'intention des décideurs". Pages 1–18 in Climate change 2007.

Girardin, M.P., Bergeron, Y., Tardif, J.C., Gauthier, S., Flannigan, M.D., Mudelesee, M. 2006. "A 229-year dendroclimatic-inferred record of forest fire activity for the boreal shield of Canada". International Journal Wildland Fire 15: 375-388.

Girardin, M.P., Raulier, F., Bernier, P.Y., Tardif, J.C. 2008. "Response of tree growth to a changing climate in boreal central Canada: a comparison of empirical, process-based, and hybrid modeling approaches". Ecological Modelling 213:209–228.

Graumlich, L.J. 1993. "Response of tree growth to climatic variation in the mixed conifer and deciduous forests of the upper Great Lakes region". Canadian Journal of Forest Research 23:133–143.

Hanewinkel M., Hummel S., Cullmann, D.A. 2010. "Modelling and economic evaluation of forest biome shifts under climate change in Southwest Germany." Forest Ecology and Management 259: 710–719.

Inventaire Forestier National (IFN). 2004. "Ressource et disponibilité forestière : une valorisation importante de l'inventaire". L'IF N°6, décembre 2004.

Inventaire Forestier National (IFN). 2011. "Prélèvements de bois en forêt et production biologique : des estimations directes et compatibles". L'IF n°28 du 3^e et 4^e trimestre 2011.

Inventaire Forestier National (IFN). 2011. "Volume de bois sur pied dans les volumes françaises : 650 millions de mètres cubes supplémentaire en un quart de siècle" l'IF N° 27, 2^e trimestre 2011.

Lecocq, F. 2008. "Evaluation économique des impacts du changement climatique pour la forêt et le secteur bois en France." Revue de la littérature. LEF.

Landmann, G., Bréda, N., Houillier, F., Dreyer, E., Flot, J.L. 2003. "Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelles conséquences pour les forêts françaises ?" Revue Forestière Française 55 : 299-308.

Lauzon, È. 2004. "Reconstitution de l'historique des feux de forêt (1680-2003) dans la région de la Gaspésie, de l'est canadien". Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Montréal. 55 p.

Lemprière, T.C., Bernier, P.Y., Carroll, A.L., Flannigan, M.D., Gilsenan, R.P., McKenney, D.W., Hogg, E.H., Pedlar, J.H., Blain, D. 2008. "L'importance d'adapter le secteur forestier aux changements climatiques. Ressource naturelle Canada". Service canadien des forêts. Centre de foresterie du Nord, Edmonton (AB). Inf. Rep. NOR-X-416F, 64 p.

Moore, B.A., Allard, G.B. 2008. "Document de travail sur la santé des forêts et la sécurité biologique FBS/34F". Division de la gestion des forêts, Département des forêts, FAO, Rome.

Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC), (2006) "Réchauffement Climatique: quelles conséquences pour la France?" Onerc, Paris, Mai 2006.

Parmesan, C., Root, T.L., Willig, M.R. 2000. "Impacts of extreme weather and climate on terrestrial biota". Bulletin of the American Meteorological Society 81:443–450.

Pausas, J.G. 2004. "Changes in fire and climate in the eastern iberian peninsula Méditerranéan bassin". Climate Change 63 :337-350.

Pearce, P., Atkinson, G., Mourato, S. 2006. "Cost-Benefit Analysis and the Environment: Recent Developments." Organisation for Economic Co-operation and Development Paris France.

Perthuis, C., Hallegate, S., Lecocq, F. 2010. "Economie de l'adaptation au changement climatique". Conseil économique pour le développement durable Février 2010.

Peyron, J.L. 1998. "Elaboration d'un système de comptes économiques articulés de la forêt au niveau national". Thèse de doctorat de l'université de Nancy II en sciences économiques. 368 p.

Peterson, C.J. 2000. "Catastrophic wind damage to North American forests and the potential impact of climate change". Science of the Total Environment 262:287–311.

Piermont, L. 2007. "Changement climatique : l'inflexion de la sylviculture engagé par la société forestière de la caisse des dépôts". *Revue Forestière Française* 2: 129-135.

Pretet, C. 2008. "Limite de l'exploitation du Douglas (*Pseudotsuga Menziesii* (Mirb) Franco var) dans le Morvan compte tenu des variations climatiques en cours et futures". Mémoire de Master 1. Université de Bourgogne.

Programme National de Recherche sur les Bioénergies (ECOBIO). 2009. "Une approche socio-économique et environnementale de l'offre de biomasse ligno-cellulosique, Projet ANR-05-PNRBBIOE- 18, Volet 2, Condition d'une mobilisation accrue de la ressource forestière, Livrable n°12, Anticiper le comportement des marchés du bois, mars 2009, 24 p.

Puech, J. 2009. "Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois". Rapport remis à Monsieur Nicolas Sarkozy Président de la République.

Reid, H., Swiderska, K. 2008. "Biodiversité, changement climatique et pauvreté". Un rapport de l'International Institute for Environment and Development (IIED).

Roman-Amat, B. 2007. "Préparer les forêts françaises aux changements climatiques". Rapport à MM. Les ministres de l'Agriculture de la pêche et de l'Ecologie du Développement et de l'Aménagement durables.

Spittlehouse, D.L. 2003. "Water availability, climate change and the growth of Douglas-fir in the Georgia Basin". *Canadian Water Resources Journal* 28: 673-688.

Spittlehouse, D.L. 2005. "Integrating climate change adaptation into forest management". *The Forest Chronicle*. 81: 691-695.

Spittlehouse, D.L. 2006. "Adaptation to climate change in forestry". *BC Journal of Ecosystems and Management*. 13: 22-23.

Spittlehouse, D. 2008. "Climate change, impacts, and adaptation scenarios: climate change and forest and range management in British Columbia". B.C. Ministry of Forest. Range Forest Sciences Program. Victoria B-C Tech. Rep. 045. [Http://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/Tr/Tr045.htm](http://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/Tr/Tr045.htm)

Volney, W.J.A., Hirsch, K. 2005. "Disturbing forest disturbances". *Forest Chronicle* 81: 662-668.

Williamson T.B., Price D.T., Beverly J.L., Bothwell, P.M., Frenkel, B., Park, J., Patriquin, M.N. 2008. "Évaluation des répercussions biophysiques et socioéconomiques potentielles du changement climatique sur les collectivités axées sur les ressources forestières : une étude de cas méthodologique". *Ressource naturelle Canadienne*. Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (AB) Rapp. D'inf. NOR-X-415F.

Yousoufpour R., Hanewinkel M., Le Moguedec G. 2010. "Evaluating the Suitability of Management Strategies of Pure Norway spruce Forests in the Black Forest Area of Southwest Germany for Adaptation to or Mitigation of Climate Change". *Environmental Management* 45: 387-402.

Annexe 1 : Calcul de la VAN scénario long

Age	N(ha)	NP/ha	Vo (m3/ha)	VP (m3/ha)	Hg (m)	Dg (cm)	VT (m3/ha)	Prix (€/m3)	Recette (€)	Coûts (€)	Recettes/coûts actualisés	
0	1100										2 240 -2240	
1											150 -147	
2											200 -192	
3											150 -141	
5											200 -181	
16											700 -510	
22	1100	385	226	70	14,8	19		5	350		226	
29	715	180	317	67	20	25		8	536		302	
42	595	190	497	143	28,2	35		45	6 435		2801	
48	345	70	555	90	31,3	40		55	4 950		1913	
55	275	275	612	612	34,4	45		70	42 840		14416	
17,8545455											Benef actu	16247
											BASI	24487

BF	Année	PH	PL
	seuil	0,41	0,32
	2050	0,79	0,44
	2100	0,93	0,68

FF	Année	PH	PL
	seuil	0,51	0,35
	2050	0,83	0,48
	2100	0,93	0,71

Annexe 2 : Calcul de la VAN scénario court

Age	N(ha)	Nb Prel/ha	Vo (m3/ha)	VP (m3/ha)	Hg (m)	Dg (cm)	VT (m3/ha)	Prix (€/m3)	Recettes (€)	Coûts (€)	recette/coûts actua	
0	1 100										1 915 -1915	
1											350 -343	
2											200 -192	
4											200 -185	
20	1100	508		135				26	3 510		2362	
25	592	150		57				32	1 824		1112	
30	442	100		59				42	2 478		1368	
40	342	342		503				62	31 186		14124	
18,85											BA	16331
											BASI	29849

BF	Année	PH	PL
	seuil	0,41	0,32
	2050	0,79	0,44
	2100	0,93	0,68

FF	Année	PH	PL
	seuil	0,51	0,35
	2050	0,83	0,48
	2100	0,93	0,71

Annexe 3 : Calcul des LEV stratégies

Séjour LEV(stratégies) [Mode de compatibilité] - Microsoft Excel

Accueil Insertion Mise en page Formules Données Révision Affichage

Calibri 11

Standard

Police Alignement Nombre Style Cellules

O18

Année	VAN	$(1+r)^{-1}$	$(1+r)^n$	LEV(Rev)	$VAN(RC)-CF/(1+r)^{-1}$	LEV(Rev)
55	16247	1,97173067	2,97173067	26291	13311	26222
40	16331	1,20803966	2,20803966	29849		29642

Stratégies	Proba FF	PH(LEV(SC2))	(1-PH)(LEV(SC1))	LEV(Stratégie)
5	0,83	24603	4458	29061
6	0,48	14228	13635	27863
7	0,93	27567	1836	29403
8	0,71	21046	7604	28650

Stratégie	Proba	PH(LEV(SC2))	(1-PH)(LEV(SC1))	LEV(Strat(i))
1	0,79	23581	5521	29102
2	0,44	29849	0	29849
3	0,93	27760	1840	29600
4	0,68	29849	0	29849
5	0,83	24775	4470	29244
6	0,48	29849	0	29849
7	0,93	27760	1840	29600
8	0,71	21193	7624	28817

Prêt