

PLANTATIONS RÉSINEUSES EN CONDITIONS FORESTIÈRES : ANALYSE ÉCONOMIQUE DES ITINÉRAIRES DÉDIÉS ET SEMI-DÉDIÉS POUR AUGMENTER LA PRODUCTION DE BOIS

HANITRA RAKOTOARISON – PRISCILLA CAILLY – CHRISTINE DELEUZE – CLAUDINE RICHTER –
ALAIN BERTHELOT

Les politiques nationales sur l'atténuation du changement climatique telles que le Grenelle de l'environnement, le paquet Énergie Climat et le discours présidentiel d'Urmatt du 19 mai 2009, visent à augmenter la consommation de bois pour les différents usages et particulièrement en bois construction (Chopard *et al.*, 2013) et en biomasse énergie. L'intensification de la production forestière est ainsi un enjeu politique, climatique et économique. Or, à l'heure actuelle, les itinéraires sylvicoles permettant aux forestiers d'augmenter l'offre en bois n'ont pas été suffisamment analysés sous l'angle économique.

En Europe, les espèces à croissance rapide spécialisées pour produire de la biomasse sont des essences feuillues menées avec une sylviculture de taillis à courte rotation (TCR) ou très courte rotation (TTCR). En surface, les trois principales essences sont les Saules (*Salix* spp., 20 000 hectares en Suède, 3 000 hectares en Grande-Bretagne), les Peupliers (*Populus* spp., 6 000 hectares en Italie) et l'Eucalyptus (*Eucalyptus* spp., 1 million d'hectares en Espagne et au Portugal ainsi que quelques milliers d'hectares dans le sud de la France) (CREFF, 2012). Ce sont des essences feuillues qui nécessitent en général des fertilités moyennes à bonnes, avec des cultures en majorité réalisées sur sols agricoles et pouvant bénéficier d'aides publiques. Ceci a soulevé des questions de risque de concurrence pour l'usage du sol avec l'alimentation humaine. En France, ces systèmes de TCR et TTCR restent peu développés par rapport à d'autres pays d'Europe mais sont déjà largement documentés grâce aux apports de différents projets de recherche menés notamment par le FCBA (Berthelot, 2009 ; Garcia et Nguyen The, 2009 ; Melun, 2009). Leur rentabilité économique semble être assez faible sans subvention (Bigot de Morogues *et al.*, 2011 ; Evieux, 2012 ; El Kasmoui et Ceulemans, 2013). Les montants de ces aides sont assez variables d'un pays à un autre : 100 euros par hectare en Biélorussie (Vandenhove *et al.*, 2002), 600 à 798 livres sterling par hectare en Grande-Bretagne (Bauen *et al.*, 2010 ; Heaton *et al.*, 1999) et nuls en France. Ces itinéraires nécessitent par ailleurs un niveau élevé d'intrants en comparaison des systèmes forestiers habituels (Heaton *et al.*, 1999 ; McKenney *et al.*, 2011).

Les essences résineuses n'ont pas été suffisamment documentées par rapport aux essences feuillues à croissance rapide, à l'exception du Pin maritime en Aquitaine. Suite aux tempêtes de 1999 puis de 2009, le groupement d'intérêt scientifique Groupe Pin maritime du Futur étudie la possibilité d'ajouter aux itinéraires sylvicoles classiques du Pin maritime des itinéraires spécialisés dénommés « dédiés » et « semi-dédiés » qui permettraient d'augmenter la production de bois sur des révolutions plus courtes, et de diminuer les risques notamment climatiques et sanitaires (Groupe Pin maritime du Futur, 2013). Si les réflexions sont donc initiées en France, les référentiels techniques pour ces itinéraires spécialisés sont encore rares et peu précis (CREFF, 2012 ; CRPF Aquitaine, 2013).

Dans le cadre du projet Futurol, le projet de recherche « Itinéraires de Cultures Innovantes en Forêt » (ICIF) animé par l'ONF, en partenariat avec l'INRA et le FCBA, a montré l'intérêt productif des essences résineuses pour répondre à la demande accrue en bois, non seulement pour la biomasse mais aussi comme matériau (Bastien *et al.* 2015 ; Berthelot *et al.* 2014), en particulier l'Épicéa, le Douglas et le Pin maritime. Le grand intérêt de ces essences est de mettre en valeur des sols forestiers, limitant ainsi la compétition pour l'usage alimentaire des sols. L'objectif de cet article est de mener pour ces trois essences une analyse économique d'itinéraires spécialisés, afin d'éclairer les gestionnaires sur ces nouvelles opportunités. Au total, un nombre conséquent d'itinéraires sylvicoles a été exploré (n=149) en faisant varier le niveau de fertilité, la densité des plantations, le nombre d'éclaircies et la durée de révolution. Par ailleurs, pour chaque itinéraire, une variante avec prélèvement des houppiers selon les recommandations du guide ADEME (Cacot, 2006) a été simulée.

Cet article est structuré en trois parties. La première partie expose la méthodologie de l'étude, avec la construction des itinéraires, les simulations, l'outil d'analyse économique et précise les sources de données économiques utilisées. La deuxième partie présente les résultats de l'analyse économique, dans les conditions économiques, climatiques et techniques actuelles, puis de manière prospective explore l'effet possible de variations de certains paramètres économiques *via* une analyse de sensibilité. Les apports et limites de l'étude sont enfin discutés.

MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDES

Construction des itinéraires

L'étude de Berthelot *et al.* (2014) a montré que le Douglas, l'Épicéa commun et le Pin maritime présentent de bons potentiels de production ligneuse. Ce sont des essences relativement bien connues, pour lesquelles les gestionnaires des forêts publiques et privées disposent de référentiels de sylviculture bien établis. Du fait de la connaissance des paramètres sylvicoles et économiques pour ces trois essences, il est possible de mener une analyse complète de nouveaux itinéraires susceptibles d'augmenter l'offre en résineux pour la filière bois.

Pour chacune de ces essences et pour différentes classes de fertilité, nous avons exploré de nouveaux itinéraires sylvicoles, de type « dédié » et « semi-dédié », pour les comparer aux « itinéraires classiques » à objectif de production de bois d'œuvre (BO) y compris bois moyen et gros bois. Ces derniers sont les référentiels mis en œuvre à l'ONF, issus des guides de sylviculture : pour le Douglas à l'échelle nationale (Angelier, 2007 ; Sardin, 2012) ; pour l'Épicéa dans les Ardennes (Sardin et Lelou, 2013) et pour le Pin maritime dans le Sud-Ouest (Sardin et Canteloup, 2003). Il est important de rappeler que les classes de fertilité bonnes (F1), moyennes (F2) et faibles (F3) sont relatives à chaque essence selon leurs exigences autécologiques dans leur zone de production respective (voir le tableau des classes de fertilité considérées en annexe 1, p.534).

Ces nouveaux itinéraires cherchent à maximiser la production annuelle moyenne, limiter la mortalité naturelle et la vulnérabilité des peuplements au vent et ceci sur une durée de production plus courte que les itinéraires classiques. Dans les simulations de croissance, la fourchette de mortalité tolérable liée à la compétition a été fixée autour de 20-30 %, en s'appuyant sur les données des réseaux d'essais FCBA et ONF. Le choix des niveaux de densité est issu des résultats de Berthelot *et al.* (2013). Le critère de diagnostic de stabilité des peuplements choisi est la hauteur dominante (Colin et Riou-Nivert, 2009). Ces objectifs multiples conduisent à l'étude d'une gamme large de révolutions pour chaque scénario.

Les itinéraires dédiés ont pour objectif de produire un maximum de bois à *usage bois d'industrie et bois énergie* (BIBE), sans faire d'éclaircie et avec une durée de révolution raccourcie, fonction de la densité de plantation. Le peuplement est récolté au maximum de production, obtenu à l'apparition de la mortalité, mais aussi avant que la hauteur du peuplement n'atteigne une hauteur dominante (H_0) limite par rapport à la vulnérabilité au vent. Ces limites de H_0 ont été fixées pour chaque essence à dire d'expert (FCBA et ONF) : 30 m pour le Douglas, 25 m pour l'Épicéa, 20 m pour le Pin maritime.

Par rapport aux itinéraires classiques, les itinéraires semi-dédiés visent une *production mixte de BIBE et de bois moyens* (diamètre moyen entre 25 et 35 cm). Ils sont plantés plus denses et bénéficient de deux éclaircies. La première éclaircie est retardée afin de maximiser une première récolte de BIBE. Elle a lieu avant que le peuplement atteigne une hauteur dominante (H_0) au-delà de laquelle le peuplement restant pourrait être plus vulnérable au vent (H_0 fixée à 19 m pour le Douglas et l'Épicéa et 12 m pour le Pin maritime, d'après expertise FCBA et ONF). 50 % des arbres sont prélevés au cours de cette première éclaircie. Une seconde éclaircie est réalisée 5 à 8 ans après (selon la fertilité), enlevant environ 30 % des tiges restantes.

Au total, 149 itinéraires ont été analysés. L'annexe 2 (p.534) donne par essence et fertilité les gammes de révolution étudiées. Pour chaque itinéraire, une option de récolte supplémentaire de houppiers (hors aiguilles) a été également étudiée. L'hypothèse utilisée correspond aux recommandations de l'ADEME (Cacot, 2006) dans le cas des sols moyennement sensibles à un risque d'appauvrissement en éléments minéraux. Les houppiers peuvent être récoltés au maximum une fois dans la vie du peuplement, à la récolte finale, pour le Douglas et le Pin maritime, et deux fois, en première éclaircie et en récolte finale, pour l'Épicéa.

Simulations de croissance des itinéraires

Les simulations de croissance ont été effectuées en utilisant les logiciels de simulation des modèles de croissance développés par FCBA : Sylveco pour le Pin maritime et Oasis pour l'Épicéa et le Douglas. Les peuplements initiaux sont issus du réseau d'essais FCBA (Berthelot *et al.*, 2015).

Selon les essences, les fertilités et les itinéraires, la production en volume ainsi que l'ensemble des variables dendrométriques (diamètre, volume unitaire, surface terrière, hauteur...) sont très variables et modifient ainsi les résultats économiques.

- *Évolution des surfaces terrières*

Pour les trois essences, les itinéraires dédiés et semi-dédiés conduisent à des surfaces terrières bien plus fortes que l'itinéraire classique comme sur l'exemple de l'Épicéa présenté en figure 1 (p.518) qui compare la croissance en surface terrière des différents itinéraires pour la fertilité bonne (F1).

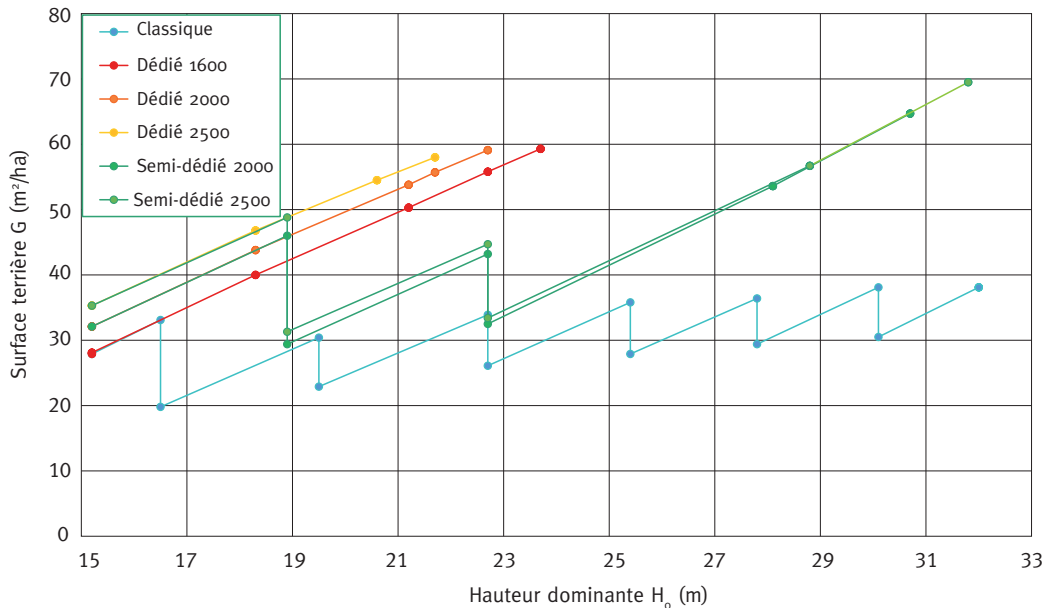
- *Production annuelle moyenne par compartiment de bois*

Pour chaque essence et chaque classe de fertilité, les productions moyennes annuelles obtenues sont comparées avec les simulations. Trois compartiments sont distingués :

- BO : volume bois fort tige (à partir d'un diamètre 7 cm sur écorce) pour un diamètre quadratique moyen de l'arbre (D_g) au-delà de 22,5 cm ;
- BIBE tige : volume bois fort tige avec $D_g < 22,5$ cm ;
- BIBE houppier : volume des menus bois (diamètre inférieur à 7 cm). Il est calculé à partir des résultats du projet Emerge (Longuetaud *et al.*, 2013).

FIGURE 1

**EXEMPLE DES SIMULATIONS DE CROISSANCE EN SURFACE TERRIÈRE (G)
OBTENUES AVEC LE SIMULATEUR OASIS POUR L'ÉPICÉA EN FERTILITÉ F1
SELON LES DIFFÉRENTS ITINÉRAIRES CLASSIQUE, DÉDIÉ ET SEMI-DÉDIÉ
ET LES DENSITÉS DE PLANTATION**



Compte-tenu des données disponibles, les récoltes de racines n'ont pas été envisagées dans ces simulations.

La figure 2 (p.519) synthétise les résultats de la production pour l'Épicéa selon les différents itinéraires et fertilités, l'annexe 3 (p.535) donne les graphiques pour les deux autres essences.

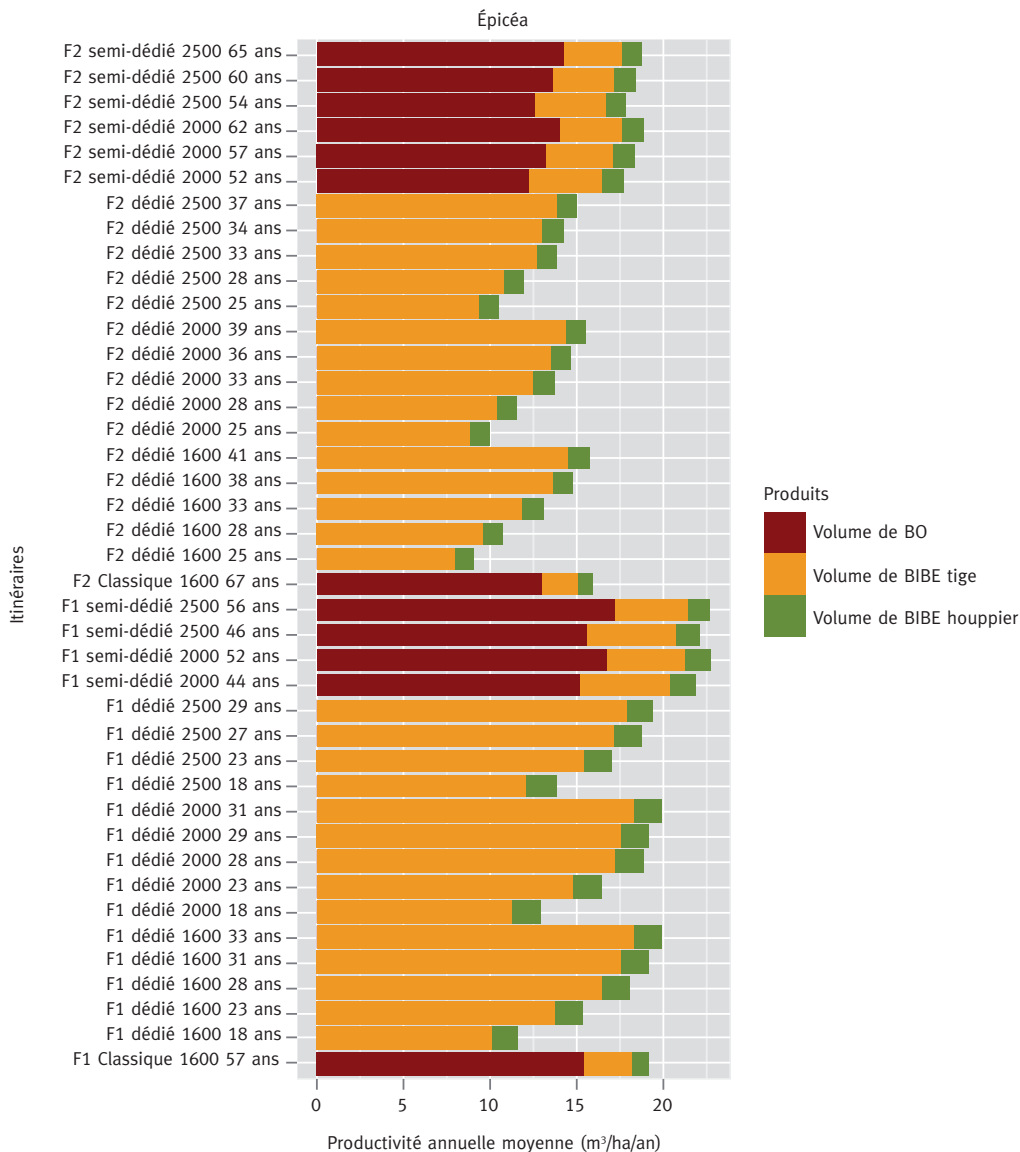
Pour les trois essences et les trois classes de fertilité, les itinéraires semi-dédiés présentent des niveaux de production annuelle moyenne en volume similaires voir supérieurs (d'environ 12 %) aux itinéraires classiques mais sur une durée de production plus courte.

Les résultats pour les itinéraires dédiés sont plus contrastés selon l'essence et l'âge de récolte finale. Pour l'Épicéa, les productions annuelles moyennes ne dépassent pas celle de l'itinéraire classique sauf pour les scénarios de durée de production d'au moins une trentaine d'années en fertilité F1. Pour le Douglas, elles dépassent celle de l'itinéraire classique pour les durées de production supérieures à une trentaine d'années pour les trois classes de fertilité. Pour le Pin maritime, les productions annuelles moyennes des itinéraires dédiés sont toutes supérieures à celle de l'itinéraire classique.

Pour les deux essences Douglas et Pin maritime, on peut noter que les simulations conduisent pour les itinéraires dédiés avec des densités initiales similaires aux itinéraires classiques, à la production de BO ($D_g > 22,5$ cm) même si ce n'est pas le produit cible de ces itinéraires. Globalement, ces niveaux de production sont proches de ceux mentionnés dans des références récentes (Bastien *et al.*, 2015 ; Berthelot *et al.*, 2014).

FIGURE 2 PRODUCTION DE BO, BIBE TIGE ET HOUPPIER DES DIFFÉRENTS ITINÉRAIRES POUR L'ÉPICÉA EN PRODUCTION ANNUELLE MOYENNE (m³/ha/an)

Légende de l'itinéraire : « F2 Semi-dédié 2500 46 ans » signifie classe de fertilité F2 (moyenne), itinéraire semi-dédié, densité de plantation de 2 500 tiges/ha, et âge (depuis la plantation) à la coupe finale de 46 ans.



Par ailleurs, on constate que les niveaux de densité de plantation ont peu d'effet sur la productivité annuelle moyenne sauf pour les itinéraires semi-dédiés et dédiés du Douglas et du Pin maritime en bonne fertilité.

Enfin, les simulations permettent d'observer que la récolte des houppiers augmente la production annuelle moyenne d'environ 7 % pour les trois essences étudiées.

Outil d'analyse économique

Dans le cadre du projet ICIF-Futuro, un outil d'analyse économique appelé *Economics* a été développé sur la plateforme Capsis (Dufour-Kowalski *et al.*, 2012). Il repose sur une approche micro-économique à long terme de l'offre et à l'échelle d'une parcelle de 1 ha. La figure 3 (ci-dessous) présente son architecture. Les entrées sont des données dendrométriques d'une part, issues de simulations de modèles de croissance ou de tables de production (date, diamètre quadratique moyen, volume unitaire moyen...), et économiques d'autre part, issues de bases de données disponibles (prix des bois, coûts de travaux...). L'outil produit en sortie des résultats sur les critères économiques suivants : bénéfice actualisé sur une révolution, bénéfice actualisé sur une infinité de révolutions, taux de rentabilité interne, bénéfice annuel moyen, recettes et coûts complets actualisés ou non, annuité constante équivalente (voir l'annexe 4, p.537 pour le détail des critères).

Cet outil donne la possibilité de réaliser des analyses de sensibilité, en étudiant sur un grand nombre d'itinéraires les variations des résultats économiques (les sorties) selon les variations individuelles ou combinées de paramètres d'entrée. Dans l'étude, ces analyses ont été menées sur sept paramètres d'entrée susceptibles de faire varier la rentabilité économique : productivité, prix du BIBE, prix du BO, ensemble des coûts, coût des travaux sylvicoles, coût de gestion et taux d'actualisation.

Le critère économique à maximiser retenu pour l'étude est le *bénéfice net actualisé en séquence infinie* (BASI), qui est la somme totale de l'ensemble des flux de recettes et des coûts de la sylviculture pour une succession infinie de révolutions. Ce critère, dit de Faustmann, est l'un des plus utilisés en économie forestière car il permet de comparer des itinéraires sylvicoles de durée différente (Peyron *et al.*, 1998). Il tient compte également des revenus futurs de la sylviculture, ce qui correspond à la valeur du fonds ou valeur de Faustmann. Ici, nous avons fixé un taux d'actualisation de 3 % comme préconisé par Terreaux (1989) et le Centre d'analyse stratégique (Gollier *et al.*, 2011).

FIGURE 3 PRÉSENTATION DE L'ARCHITECTURE DU MODULE *ECONOMICS* IMPLÉMENTÉ DANS CAPSIS

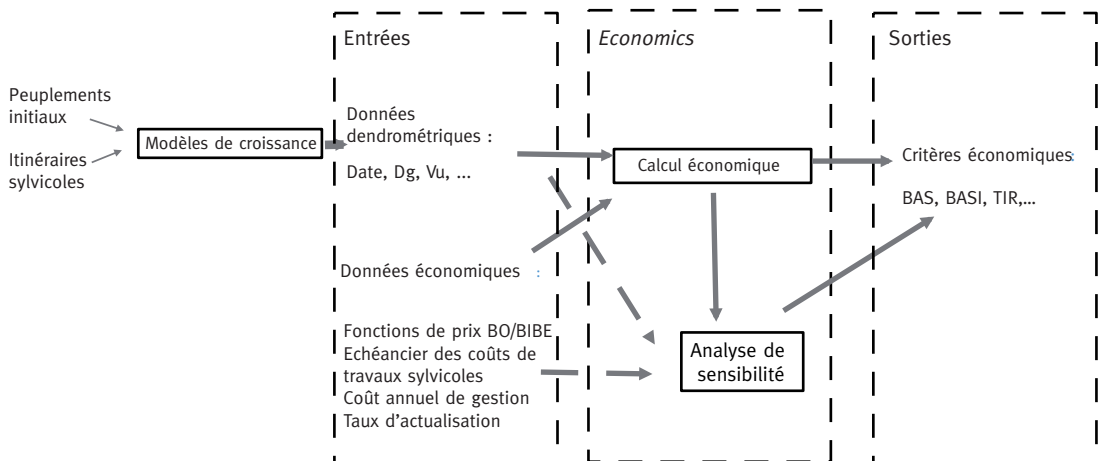
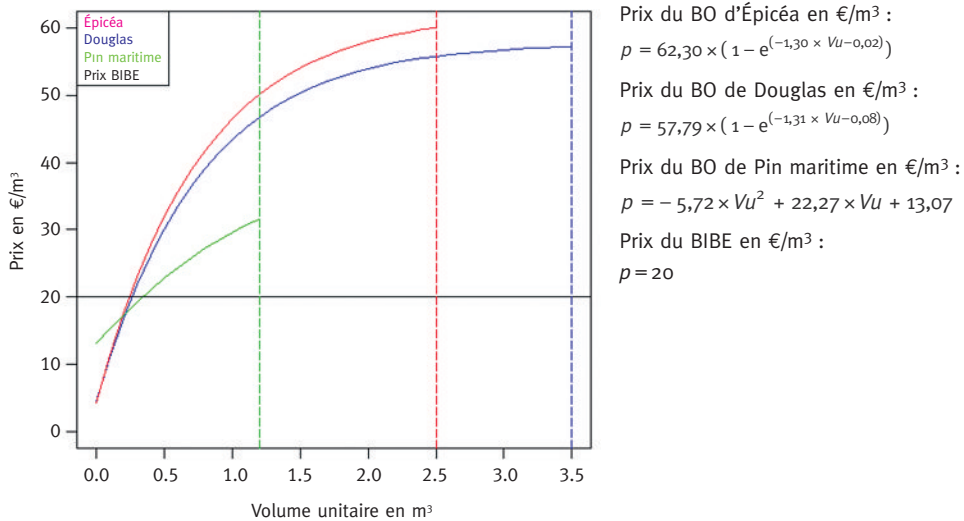


FIGURE 4

**COMPARAISON DES 3 FONCTIONS DE PRIX UTILISÉES
DANS LES SIMULATIONS ÉCONOMIQUES POUR LES 3 ESSENCES RÉSINEUSES.**
En pointillés, les limites maximales de volumes unitaires pour nos itinéraires.



Sources des données sur le prix du bois sur pied

La fonction de prix pour le Douglas a été estimée à partir de 97 lots issus des ventes par appel d'offre de l'ONF, dans le Limousin entre 2012 et le printemps 2015 (lots quasiment purs). Elle n'est valable que jusqu'à un volume unitaire moyen de 3,5 m³/arbre.

La fonction pour l'Épicéa a été obtenue à partir de données sur la période de 2012 au printemps 2015 : de l'ONF dans les Ardennes et en Alsace, de l'expert forestier Michel Chavet publiées trimestriellement dans *la Forêt privée* (lots mélangés avec le Sapin) et enfin à partir d'une fonction de prix publiée par Guo et Peyron (1995). Elle est valable pour un volume unitaire inférieur à 2,5 m³/arbre.

La fonction pour le Pin maritime a été calibrée avec des données de 594 lots issus des ventes par appel d'offre de l'ONF dans la région Aquitaine entre 2012 et le printemps 2015 (lots quasiment purs). Elle est valable pour un volume unitaire inférieur à 1,2 m³/arbre.

Les conditions de commercialisation et de valorisation locales peuvent avoir une influence particulière sur les prix des gros bois.

RÉSULTAT DES ANALYSES ÉCONOMIQUES

Comparaisons des itinéraires dans les contextes économiques actuels

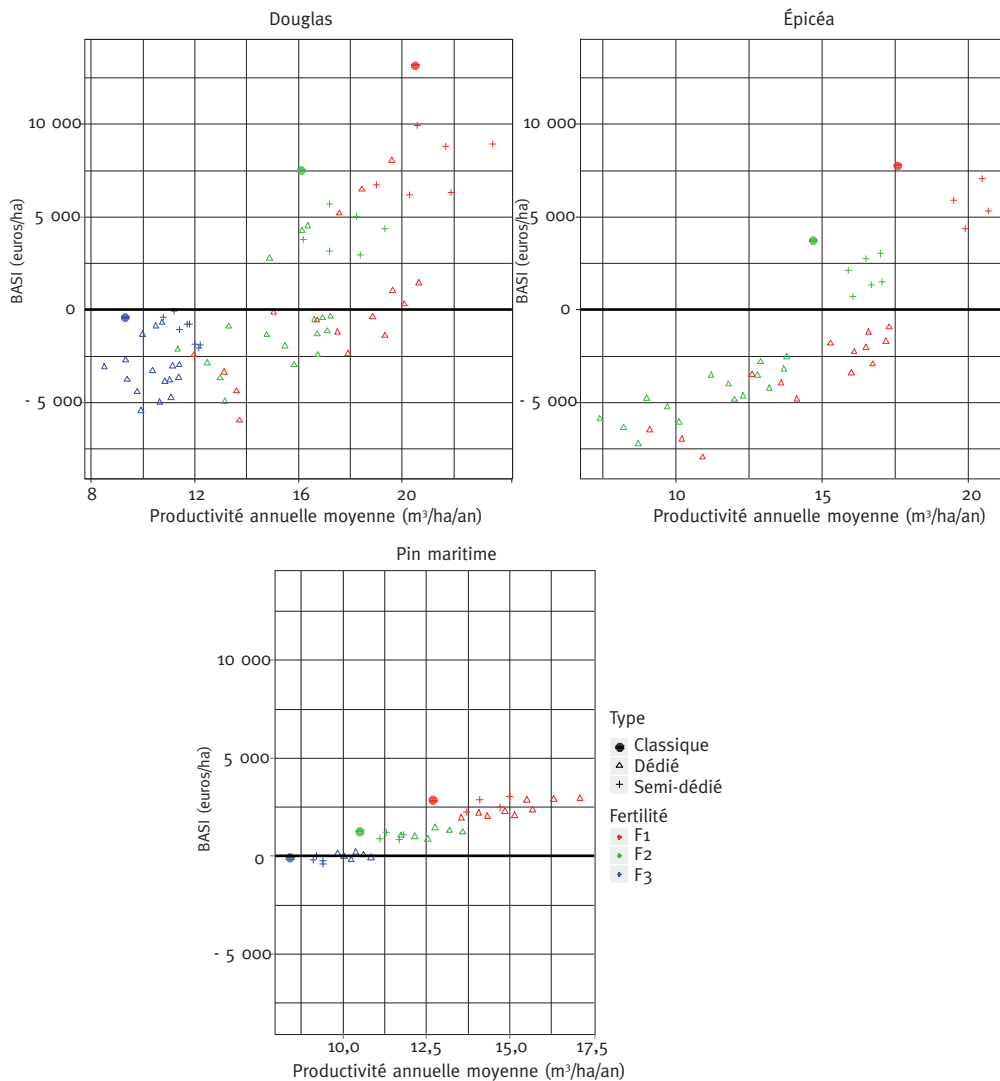
- *Effet de la productivité sur la rentabilité*

Dans un premier temps, nous avons analysé les valeurs de BASI sans prendre en compte la valorisation des houppiers (le seul BIBE récolté correspond donc aux tiges de Dg < 22,5 cm).

FIGURE 5

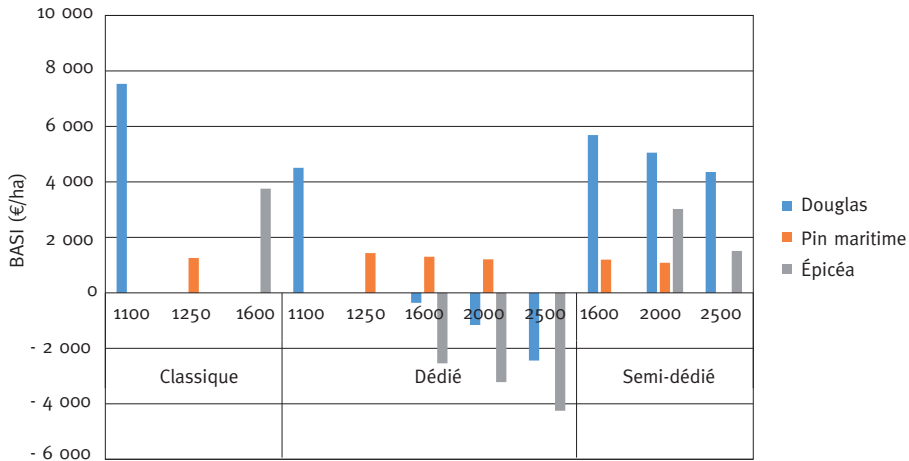
COMPARAISON DE LA RENTABILITÉ DES ESSENCES EN FONCTION DU NIVEAU DE PRODUCTION ANNUELLE MOYENNE

(F1 : fertilité bonne, F2 : fertilité moyenne, F3 : fertilité basse)



La figure 5 (ci-dessus) montre que les BASI des itinéraires classiques restent actuellement les plus élevés pour l'Épicéa et le Douglas. Ils sont cependant suivis de près par ceux des itinéraires semi-dédiés. En revanche la plupart du temps, les itinéraires dédiés ne sont pas rentables avec des BASI négatifs, sauf pour les itinéraires dédiés de Douglas en fertilité bonne ou moyenne lorsqu'ils produisent du BO de petits sciages. Pour les itinéraires dédiés et semi-dédiés de Pin maritime, les valeurs de BASI sont proches de celles des itinéraires classiques.

FIGURE 6 COMPARAISON DES BASI DES ITINÉRAIRES OPTIMISÉS AVEC LA RÉVOLUTION, PAR ESSENCE, ET SELON LA DENSITÉ EN FERTILITÉ F₂



Pour les trois essences, et de manière marquée pour le Pin maritime, ces nouveaux itinéraires permettent d'avoir des niveaux de production annuelle moyenne plus élevés que les itinéraires classiques. De manière générale, la rentabilité économique de ces itinéraires augmente avec la productivité, qui dépend de l'essence, de la fertilité, et du choix combiné de la densité de plantation et de la révolution. Ainsi, la rentabilité est systématiquement améliorée en récoltant le bois à l'âge où la productivité est au maximum, sous la double condition d'une mortalité faible et de la stabilité du peuplement.

- *Effet de la densité de plantation sur la rentabilité*

La figure 6 (ci-dessus) compare la rentabilité des itinéraires selon la densité de plantation en fertilité moyenne (les mêmes tendances sont observées pour les autres fertilités) en ne retenant, pour chaque densité, que l'itinéraire donnant le meilleur BASI parmi les différentes révolutions explorées, autrement dit l'itinéraire optimisé.

Pour le Douglas et l'Épicéa, malgré une légère augmentation de la production annuelle moyenne, la rentabilité diminue lorsqu'on augmente la densité de plantation et donc les coûts associés. Pour le Pin maritime, cette tendance est moins marquée du fait de coûts de plants et d'installation plus faibles d'une part, mais aussi, des écarts de prix plus réduits entre BIBE et BO, pour une productivité accrue par rapport aux itinéraires classiques.

En itinéraire dédié, pour les fertilités F₂ et F₃, les meilleures rentabilités sont obtenues pour des densités de plantation de 1100 tiges/ha pour le Douglas, 1600 tiges/ha pour l'Épicéa et 1250 tiges/ha pour le Pin maritime, qui sont les densités initiales des itinéraires classiques. En fertilité F₁, les itinéraires avec des densités plus fortes (1600 ou 2000 tiges/ha) sont rentables pour le Pin maritime.

Pour les itinéraires semi-dédiés, on retrouve la même tendance que pour les itinéraires dédiés. Pour le Douglas, les plantations à 1600 tiges/ha sont plus intéressantes que celles à 2000 ou

2 500 tiges/ha. Des plantations d'Épicéa à 2 000 tiges/ha sont plus rentables qu'à 2 500 tiges/ha. Les densités initiales les plus faibles semblent donc les plus intéressantes du point de vue de l'analyse économique avec les hypothèses que nous avons faites, mais nous n'avons pas exploré de densités inférieures à celles des itinéraires classiques.

- *Effet de la récolte additionnelle de houppiers sur la rentabilité*

Les simulations avec récolte de houppiers (selon les modalités présentées dans le paragraphe "Construction des itinéraires", p. 516), donnent des gains de BASI entre 22 et 874 euros/ha variables selon les essences, les fertilités et les itinéraires. Pour les itinéraires déjà rentables, le gain reste modéré car les volumes de houppiers résineux restent réduits (environ 7 %) et pour un prix BIBE actuellement de 20 €/m³. Les gains relatifs sont les plus faibles pour les itinéraires classiques et les plus élevés pour les itinéraires les moins rentables, ce qui est le cas des itinéraires dédiés.

Cependant ces résultats seraient à consolider parce qu'on ne considère pas ici les risques environnementaux liés aux récoltes de houppiers (impact sur la fertilité physique et chimique des sols, biodiversité...), les surcoûts potentiels liés aux exploitations, et les pertes elles-mêmes de matière puisqu'en réalité on ne récolte pas la totalité de ces menus bois (Landmann et Nivet, 2014).

Résultats des analyses de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été menée afin de déterminer les variables ou les combinaisons de variables d'entrées qui contribuent le plus en sortie aux variations de la variable d'intérêt (ici la rentabilité économique approchée par le BASI) et qui méritent d'être suivies de près pour anticiper les évolutions possibles.

Cette analyse a été effectuée pour les trois essences et les trois niveaux de fertilité. Nous présentons ici le résultat pour deux variables économiques majeures qui sont les prix du BIBE et du BO, sous l'hypothèse que ces variations sont indépendantes. L'évolution des prix de ces deux types de produits dépend de marchés bien distincts. Cette analyse permet d'explorer l'effet individuel de l'évolution d'un marché sur les résultats économiques.

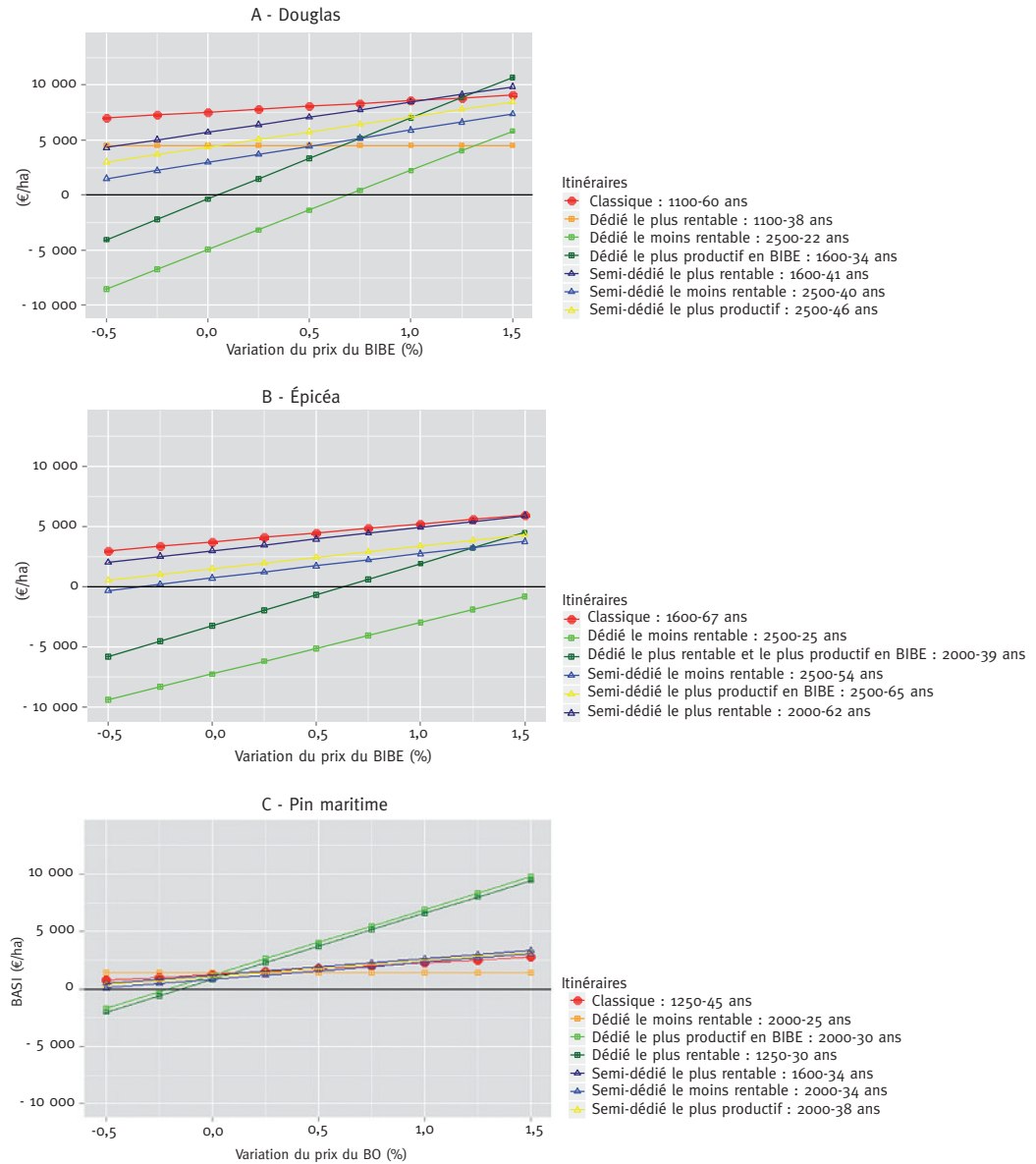
La variation de la rentabilité est comparée pour chaque essence, en fertilité moyenne, sans récolte additionnelle de houppiers, pour l'itinéraire classique et les nouveaux itinéraires dédiés et semi-dédiés, en considérant pour ces deux derniers le plus et le moins rentable (dans les conditions actuelles) et le plus productif en BIBE (donc potentiellement intéressant pour le secteur énergétique).

- *Effet de la variation du prix du BIBE*

Les raisons des changements du prix BIBE peuvent être très diverses : hausse de la demande en bois énergie, prix des autres sources d'énergie, amélioration de la performance des installations... Dans cette première approche, nous avons choisi de regarder l'effet de la variation du prix du BIBE sur une amplitude large de - 50 % à + 150 % par rapport à la valeur moyenne obtenue en 2014, soit 20 €/m³. Les résultats de ces simulations sont donnés en figure 7 (p.526), dans laquelle chaque itinéraire est identifié par type, densité de plantation (t/ha) et révolution (ans).

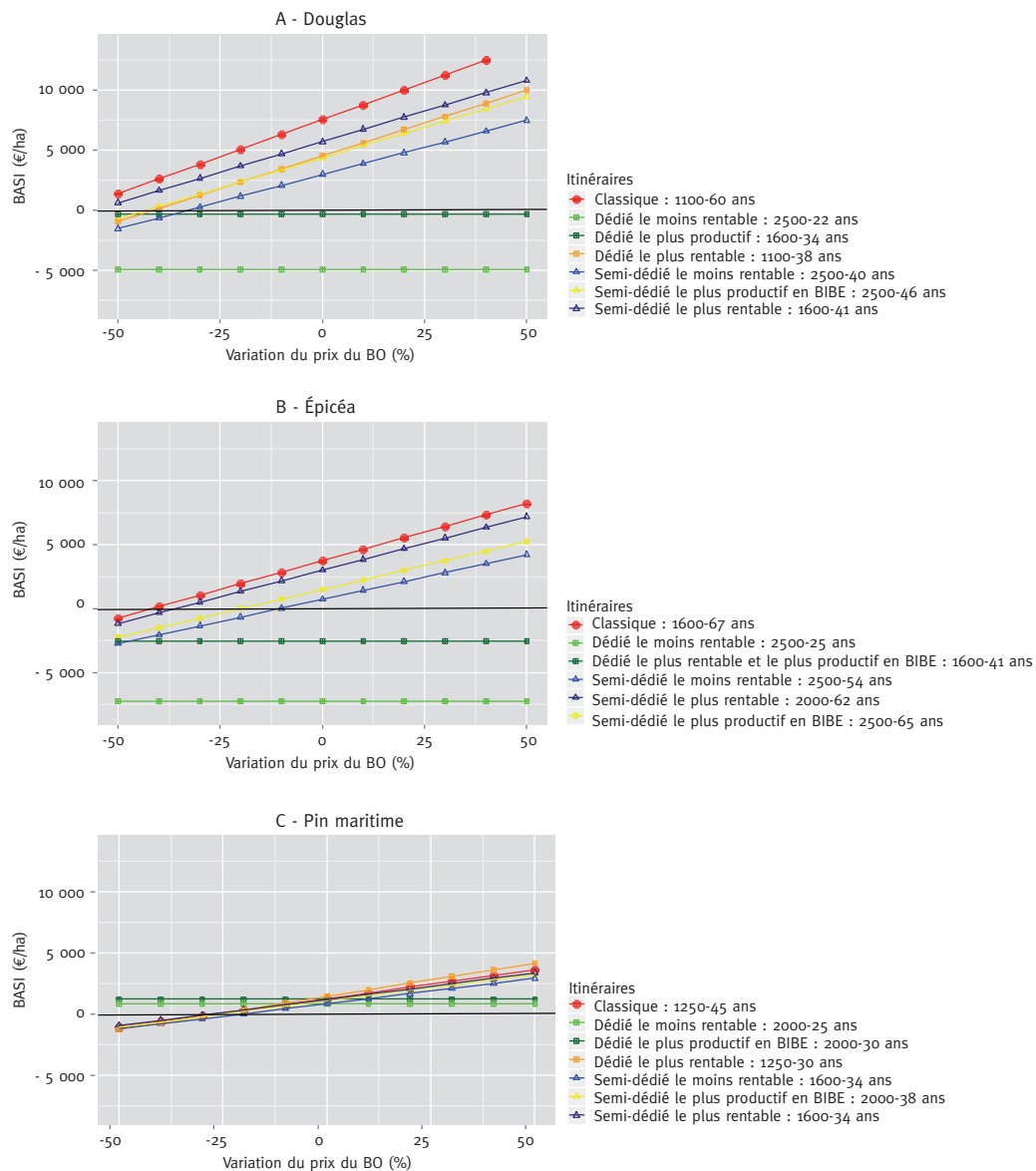
La sensibilité aux variations de prix du BIBE est différente selon les essences et les types de sylviculture. Pour le Douglas (figure 7A), le doublement du prix du BIBE par rapport au niveau 2014, permet à l'itinéraire semi-dédié le plus rentable de rattraper le classique. Une augmentation d'environ 125 % (soit 45 €/m³ sur pied) fait passer la rentabilité de l'itinéraire dédié le plus productif en BIBE devant celle de l'itinéraire classique. La performance des itinéraires dédiés et semi-dédiés les moins rentables demeure inférieure au classique mais l'écart se réduit avec l'augmentation du prix du BIBE. Pour l'Épicéa (figure 7B), le changement de hiérarchie de rentabilité des itinéraires

FIGURE 7 INFLUENCE DE LA VARIATION DU PRIX DU BIBE SUR LE BASI EN FERTILITÉ F2



n'est pas atteint dans la gamme de variation de prix du BIBE étudiée. Le Pin maritime (figure 7C) est l'essence la plus sensible : une légère augmentation du prix du BIBE au-dessus de la valeur 2014 suffit à faire passer les itinéraires dédiés au-dessus de l'itinéraire classique. Les itinéraires semi-dédiés, même les plus productifs en BIBE, restent proches du classique compte tenu de la

FIGURE 8 INFLUENCE DE LA VARIATION DU PRIX DU BO SUR LE BASI EN FERTILITÉ F2



faible proportion de BIBE dans la production totale. Les itinéraires dédiés les plus rentables du Douglas et du Pin maritime restent invariants en rentabilité avec les modifications du prix du BIBE du fait de l'obtention de 100 % de BO à la récolte.

- *Effet de la variation du prix du BO*

Les prix du BO résineux sont également très dépendants du marché international, du dynamisme du secteur de la construction et de la concurrence exercée par les autres matériaux de construction (béton, fer...). Dans cette analyse, nous avons fait varier les courbes de prix de chaque essence, obtenues sur la période récente (2012-2015), sur une plage de variation de $\pm 50\%$, compte-tenu des variations temporelles observées dans le passé (ONF, 2014a).

La figure 8 (A, B) (p. 527) montre que pour le Douglas et l'Épicéa, en fertilité moyenne (F2), la hausse du prix du BO par rapport aux courbes actuelles ne modifie pas la hiérarchie de la rentabilité des itinéraires : le classique est supérieur aux semi-dédiés qui sont supérieurs aux dédiés. Si le prix du BO augmente, l'écart s'amplifie à l'avantage de l'itinéraire classique. Par contre et seulement pour le Pin maritime (figure 8C), les itinéraires semi-dédiés et dédiés les plus rentables restent au même niveau de rentabilité que l'itinéraire classique. Une diminution du prix du BO au-delà de 20 % environ rend les itinéraires dédiés produisant du BIBE plus attractifs que l'itinéraire classique.

SYNTHÈSE ET DISCUSSION

Cet article présente une analyse économique à long terme explorant une palette large d'itinéraires sylvicoles, qui seraient capables d'augmenter la production de bois, avec des niveaux de risques (mortalité naturelle, vent...) acceptables.

Il permet de donner les résultats principaux suivants.

Des différences sensibles entre les trois essences résineuses

Pour le Douglas, les itinéraires dédiés à révolutions très courtes entre 20 et 30 ans, ne sont pas rentables dans les conditions actuelles. Au-delà de 30 ans, certains itinéraires dédiés peuvent être rentables mais en restant à un niveau bien inférieur à celui du classique. Ceci vient du niveau de prix actuel faible du BIBE. *A contrario*, les itinéraires semi-dédiés du Douglas en fertilité bonne et moyenne sont rentables, et permettent d'accroître la productivité annuelle moyenne mais avec une performance économique qui reste inférieure aux itinéraires classiques. Les rentabilités les plus intéressantes sont obtenues pour les densités de plantation 1600 et 2000 tiges/ha, et une révolution raccourcie par rapport au scénario classique d'une quinzaine d'années en fertilité bonne et d'une vingtaine d'années en fertilité moyenne. Ce résultat pour les itinéraires semi-dédiés vient, d'une part, des dimensions plus faibles des produits finaux entraînant des prix du BO plus faibles et, d'autre part, des surcoûts d'investissement nécessaires en termes d'achat et d'installation des plants.

Pour l'Épicéa, aucun des itinéraires dédiés étudiés n'est rentable dans les conditions actuelles de prix du bois. Pour les itinéraires semi-dédiés étudiés aux densités de plantation 2000 et 2500 tiges/ha, les résultats sont similaires à ceux du Douglas mais avec un plus faible raccourcissement de la révolution de l'ordre d'une dizaine d'années. Aux surcoûts d'investissement et à la différence de prix des catégories d'usage, s'ajoute pour l'Épicéa l'effet de la faible productivité annuelle aux jeunes âges comparée au Douglas, qui pénalise des itinéraires courts.

Pour le Pin maritime, quelle que soit la fertilité, les itinéraires dédiés et semi-dédiés semblent déjà être à des niveaux de rentabilité proches de l'itinéraire classique, avec une révolution raccourcie d'une dizaine d'années. Cela vient à la fois de la hausse significative de la productivité annuelle apportée par ces itinéraires, d'une hausse récente du prix du BIBE en Aquitaine qui réduit

l'écart avec celui du BO et d'un coût d'achat et d'installation des plants nettement plus faible par rapport aux deux autres essences. Les progrès réalisés ces dernières années dans les travaux d'installation des plants de Pin maritime expliquent un investissement déjà optimisé pour ces itinéraires denses et courts.

Autres résultats marquants

La récolte supplémentaire des houppiers n'apporte qu'un gain marginal mais variable selon l'essence et la fertilité. Ceci vient du volume faible de houppiers des résineux par rapport à la production totale et du niveau actuel des prix du BIBE. L'impact économique dépend cependant d'autres facteurs non pris en compte dans cette analyse : les pertes de biomasse lors des exploitations, les effets sur la biodiversité et la fertilité des sols, et les surcoûts associés pour gérer ces impacts.

Certains des itinéraires dédiés et semi-dédiés en fertilité bonne ou moyenne pourraient atteindre la rentabilité des itinéraires classiques avec une hausse du prix du BIBE. Pour le Douglas, il faudrait au moins un doublement de prix pour les rendre attractifs pour les forestiers. Pour le Pin maritime, une légère augmentation du prix du BIBE suffirait. L'Épicéa est l'essence la moins sensible aux variations du prix du BIBE. De nombreux paramètres sont cependant susceptibles de moduler l'attractivité de ces nouveaux itinéraires, notamment l'évolution du prix du BO, des coûts d'installation, des subventions...

Des limites présentes dans les outils et les hypothèses

De manière générale, l'étude de la rentabilité sur le long terme nécessite la prise en compte des risques et des incertitudes, non intégrés ici, d'ordre physique et biologique (gibier, sécheresse, pathogènes, changement climatique, changement de productivité...), ou d'ordre économique et financière (taux d'actualisation, crise économique, politique publique...).

En ce qui concerne les outils, la méconnaissance du domaine de validité des modèles de croissance utilisés ne permet pas de donner un intervalle de confiance sur les résultats. Par ailleurs, les estimations de volume, de surface terrière et de diamètre ont été effectuées à partir de données issues de dispositifs expérimentaux installés implicitement dans des peuplements pleins et les plus homogènes possibles, ce qui peut donner des valeurs différentes dans les conditions de gestion.

Quant à nos hypothèses, elles donnent bien sûr matière à discussion à commencer par les prix du bois. La modélisation des prix a été basée sur des données récentes disponibles. Même si l'analyse de sensibilité a étudié les effets des variations des prix sur la rentabilité des itinéraires, il est extrêmement difficile de prévoir dans le futur la valorisation (demande du marché, équipements industriels...) et les prix du bois par essence et catégorie. Pour illustrer, si la difficulté actuelle de valorisation des gros bois s'accroît, ceci pourrait éventuellement donner un avantage aux itinéraires semi-dédiés par rapport aux itinéraires classiques. Les coûts des travaux peuvent aussi augmenter ou diminuer dans l'avenir mais surtout, ils intègrent une importante composante variable selon les contextes des stations, la difficulté d'exploitation et la capacité des sols à supporter des itinéraires intensifs.

Bien que les analyses de sensibilité aient apporté des résultats intéressants, elles restent à approfondir. Potentiellement, une comparaison sur le différentiel entre les prix du BIBE et du BO ainsi qu'une intégration du lien entre les coûts des travaux et la productivité pourraient être la suite de l'analyse économique présentée dans cet article.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette analyse économique sur trois essences résineuses majeures de la forêt française (Pin maritime, Douglas, Épicéa) apporte des éléments de réflexion sur la gestion sylvicole des peuplements face à la hausse de la demande en bois en étudiant sans *a priori* de nouveaux itinéraires spécialisés. La démarche proposée ici repose sur une stratégie de diversification des itinéraires sylvicoles pour y répondre, contrairement à une autre stratégie de gestion à court terme qui consisterait à couper le bois en fonction du prix du marché. Ainsi, les forestiers pourraient réfléchir dans une forêt ou un massif à diversifier leurs objectifs et à installer sur certaines zones propices à ce genre d'itinéraires, à plus courte révolution et procurant du bois pour l'industrie, l'énergie ou des sciages de résineux à moyen terme, en complément des itinéraires actuels.

Concernant ces nouveaux itinéraires spécialisés, l'article donne des résultats différenciés selon le type d'itinéraire envisagé et l'essence considérée. Pour le Douglas et l'Épicéa, les itinéraires semi-dédiés et dédiés ont une rentabilité inférieure aux itinéraires classiques selon les hypothèses faites dans cette étude et dans les conditions économiques actuelles. Pour le Pin maritime, ces nouveaux itinéraires présentent des résultats proches de ceux des itinéraires actuels. Les itinéraires dédiés sont adaptés spécifiquement à la demande d'approvisionnement du secteur énergétique. Les itinéraires semi-dédiés semblent présenter un plus grand intérêt pour le secteur forestier. Ils augmentent sensiblement la productivité annuelle moyenne, tout en assurant un approvisionnement mixte BIBE avec du bois moyen pour la construction, qui constitue un enjeu fort de développement durable. L'atout commun à ces nouveaux itinéraires réside dans le raccourcissement de la révolution avec un niveau de risque au vent acceptable.

Ils demandent cependant certaines conditions d'installation, en visant plutôt des bonnes fertilités pour ces essences, une gestion effective de l'équilibre forêt-gibier permettant de s'affranchir des coûts élevés de protection, des conditions d'exploitation adaptées (pente et accès) et une filière forêt-bois dynamique dans le domaine de la mobilisation et de la transformation du bois. Pour réussir un projet de reboisement, il n'est pas inutile de rappeler aussi l'exigence générale de bonne maîtrise de toute la chaîne technique et logistique pour l'installation du peuplement, depuis le diagnostic des contraintes du milieu, aux travaux préparatoires (sol, végétation concurrente) à réaliser jusqu'à la mise en place de plants de qualité requise. En la matière, les acteurs amont de la filière forêt-bois dressent plutôt un constat d'alerte sur une perte de compétences techniques en plantation (AFORCE, 2014).

L'intérêt pour ces nouveaux itinéraires pourrait évoluer selon différents leviers. Un niveau de prix du BIBE suffisamment élevé par rapport au prix du BO est sans doute le facteur clef pour augmenter la rentabilité économique. Des avancées technologiques et scientifiques (sur le matériel génétique utilisé, l'optimisation de la mécanisation des travaux forestiers, la gestion de la fertilité des sols...) sont aussi à poursuivre pour améliorer la productivité des forêts plantées tout en maîtrisant les impacts (sur le sol, l'eau, la biodiversité, le bilan carbone...)⁽¹⁾. Les politiques publiques peuvent aussi être un levier décisif pour développer l'offre en réponse aux différents scénarios prospectifs d'évolution de la demande en bois (matériau, biomasse, chimie verte). On peut mentionner par exemple le soutien aux investissements forestiers (renouvellement, infrastructure), l'appui aux filières professionnelles (pépiniéristes, entreprises de travaux forestiers, scieries...), l'étude de possibilités novatrices de subvention de produits bois ronds aux côtés d'aides incitatives pour le développement du bois énergie...

(1) Ces impacts font l'objet de suivi à long terme sur le dispositif expérimental mis en place dans les Ardennes dans le cadre du projet ICIF (ONF, 2014b).

Le travail de réflexion sur ces itinéraires mérite finalement d'être poursuivi. Il ouvre de nombreuses pistes de recherche nécessaires pour améliorer les outils de simulation, évaluer les itinéraires avec une approche multicritère (économie, environnement, acceptabilité sociale...), et réfléchir à l'intégration de ces itinéraires à l'échelle plus large de territoires.

Hanitra RAKOTOARISON
Chargée de R&D
OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
Département Recherche Développement et Innovation
Boulevard de Constance
F-77300 FONTAINEBLEAU
(hanitra.rakotoarison@onf.fr)

Priscilla CAILLY
Ingénieur E&R Forestières Sylviculture et Modélisation
FCBA Délégation territoriale Sud-Ouest
71 Route d'Arcachon
F-33610 CESTAS
(priscilla.cailly@fcba.fr)

Christine DELEUZE
Chargée de R&D
OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
Département Recherche Développement et Innovation
21 rue du Muguet
F-39100 DOLE
(christine.deleuze@onf.fr)

Claudine RICHTER
Responsable de pôle R&D
OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
Département Recherche Développement et Innovation
Boulevard de Constance
F-77300 FONTAINEBLEAU
(claudine.richter@onf.fr)

Alain BERTHELOT
Ingénieur de Recherche
FCBA Délégation territoriale Nord-Est
60 route de Bonnencontre
F-21170 CHARREY-SUR-SAÔNE
(alain.berthelot@fcba.fr)

Remerciements

Ces travaux ont bénéficié du soutien financier du projet FUTUROL et de BPI-Oséo (www.projet-futurool.com).

Les auteurs remercient particulièrement pour leur contribution à l'apport de données, leur aide pour la construction des itinéraires et leurs réflexions avisées pour l'article : Francis Bigot de Morogues, Jean-Mathieu de Boissesson, Alain Bouvet, Bruno Chopard, Thierry Sardin, et Régine Touffait.

Ce travail a aussi bénéficié d'un soutien de François de Coligny pour le développement du module Economics et son implémentation sur la plateforme Capsis.

BIBLIOGRAPHIE

AFORCE. — Réseau mixte technologique Adaptation des forêts au changement climatique. Colloque de restitution des 4 et 5 décembre 2014 à l'INRA Pierroton. Présentation des travaux du groupe 3 sur la création et la conduite du renouvellement des peuplements. — [En ligne] disponible sur : <http://www.reseau-aforce.fr/colloque-restitution-3-436260.html>

ANGELIER (A.). — Douglasiaes françaises. — Paris : ONF, 2007. — 296 p.

- ASFFOR, SOCIÉTÉ FORESTIÈRE DE LA CAISSE DES DÉPÔTS, EXPERTS FORESTIERS DE FRANCE. — Le Prix de vente des bois sur pied en forêt privée : Indicateur 2015. — Paris : France Bois Forêt, 2015. — 16 p.
- BASTIEN (J.-C.), BERTHELOT (A.), BRIGNOLAS (F.), MARRON (N.), MAURY (S.), BODINEAU (G.), GAUVIN (J.), TOILLON (J.), DALLE (E.), DELAUNAY (A.), LE JAN (I.), CHARNET (F.), MAINE (P.), MERZEAU (D.). — Augmenter le niveau de production de biomasse des cultures ligneuses dédiées ou semi-dédiées. Principaux enseignements du projet SYLVABIOM. — *Revue forestière française*, vol. LXVII, n° 3, 2015, pp. 249-263.
- BAUEN (A.W.), DUNNETT (A.J.), RICHTER (G.M.), DAILEY (A.G.), AYLOTT (M.), CASELLA (E.), TAYLOR (G.). — Modelling supply and demand of bioenergy from short rotation coppice and Miscanthus in the UK. — *Bioresource Technology*, vol. 101, n° 101, 2010, pp. 8132-8143.
- BERTHELOT (A.). — Espèces ligneuses pour la production de biomasse : le Peuplier. — Enerbio, Fondation Tuck, FCBA, 2009. — 4 p.
- BERTHELOT (A.), BOUVET (A.), DA SILVA PEREZ (D.). — État de l'art sur l'installation de cultures dédiées biomasse en forêt. — FCBA, Projet ONF-FUTUROL, 2013. — 67 p. (Rapport final du projet ICIF).
- BERTHELOT (A.), BOUVET (A.), RICHTER (C.), GIBAUD (G.). — Potentialités de production de biomasse de quelques essences résineuses en conditions forestières : Douglas, Épicéa commun, Épicéa de Sitka, Cyprès de Leyland, Séquoia toujours vert. — *Revue forestière française*, vol. LXVI, n° 5, 2014, pp. 695-713.
- BERTHELOT (A.), CAILLY (P.), BOUVET (A.). — Le Réseau d'essais forestiers de FCBA : un patrimoine scientifique unique pour accompagner la forêt dans ses évolutions. — *FCBA Info*, 2015. — 7 p.
- BIGOT DE MOROGUES (F.), NGUYEN THE (N.), BERTHELOT (A.), MELUN (F.). — Réflexions sur la rentabilité des taillis à courte et à très courte rotation d'Eucalyptus et de Peuplier. — *Revue forestière française*, vol. LXIII, n° 6, 2011, pp. 705-721.
- CACOT (E.). — La Récolte raisonnée des rémanents en forêt. — Paris : ADEME, 2006. — 36 p.
- COLIN (F.), RIOU-NIVERT (P.). — Relations entre résistance au vent, descripteurs du peuplement et sylviculture. — *Innovations agronomiques*, vol. 6, 2009, pp. 39-49.
- CHOPARD (B.), DELEUZE (C.), FRANÇOIS (D.), COLLET (R.), BOUDEY (A.), MOUREAUX (T.). — Comprendre l'évolution de la demande de bois résineux en France pour mieux l'intégrer dans la gestion forestière. — *Rendez-Vous techniques de l'ONF*, n° 39-40, 2013, pp. 7-30.
- CREFF. — Guide technique taillis à courte et à très courte rotation. — 2012. — 42 p.
- CRPF Aquitaine. — Des sylvicultures nouvelles pour la production de biomasse. Mémento aquitain du bois énergie. — Bordeaux : CRPF Aquitaine, 2013. — 7 p.
- DUFOUR-KOWALSKI (S.), COURBAUD (B.), DREYFUS (P.), MEREDIEU (C.), COLIGNY (F.). — Capsis : an open software framework and community for forest growth modelling. — *Annals of Forest Science*, vol. 69, 2012, pp. 221-233.
- EL KASMIQUI (O.), CEULEMANS (R.). — Financial Analysis of the Cultivation of Short Rotation Woody Crops for Bioenergy in Belgium : Barriers and Opportunities. — *Bioenergy Research*, vol. 6, n° 1, 2013, pp. 336-350.
- EVIEUX (Y.). — Quel avenir pour la production de biomasse énergie en agroforesterie ? — *Forêt Entreprise*, n° 205, 2012, pp. 42-45.
- FAUSTMANN (M.). — Berechnung des Werthes, welchen Waldboden, sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen. — *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 1849, pp. 441-455.
- GARCIA (J.), NGUYEN THE (N.). — Espèces ligneuses pour la production de biomasse : le robinier faux-acacia. — Enerbio, Fondation Tuck, FCBA, 2009. — 4 p.
- GOLLIER (C.), BAUMSTARK (L.), FERY (P.), AUVERLOT (D.), RAYNARD (C.). — Le Calcul du risque dans les investissements publics. — Paris : Centre d'analyse stratégique, 2011. — 236 p.
- GROUPE PIN MARITIME DU FUTUR. — Installation des peuplements. — *Les Cahiers de la Reconstitution*, n° 3, 2013, pp. 1-12.
- GUO (B.), PEYRON (J.-L.). — Optimiser la sylviculture à long terme des peuplements forestiers équiennes grâce au logiciel Sylopt. — *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° spécial "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois", 1995, pp. 120-130.
- HEATON (R.J.), RANDESON (P.F.), SLATER (F.M.). — The economics of growing short rotation coppice in the uplands of mid-Wales and an economic comparison with sheep production. — *Biomass Bioenergy*, vol. 17, n° 1, 1999, pp. 59-71.
- JARRET (P.). — Guide des sylvicultures — Chênaie atlantique. — Paris : ONF, 2004. — 335 p.
- LANDMANN (G.), NIVET (C.). — Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité. — Angers : ADEME ; Paris : Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2014. — 243 p. (Rapport final du projet Resobio).

- LONGUETAUD (F.), SANTENOISE (P.), MOTHE (F.), SENGAKIESSE (T.), RIVOIRE (M.), SAINT-ANDRÉ (L.), OGNOUABI (N.), DELEUZE (C.). — Modeling volume expansion factors for temperate tree species in France. — *Forest Ecology and Management*, vol. 292, 2013, pp. 111-121.
- MCKENNEY (D.W.), YEMSHANOV (D.), FRALEIGH (S.), ALLEN (D.), PRETO (F.). — An economic assessment of the use of short-rotation coppice woody biomass to heat greenhouses in southern Canada. — *Biomass Bioenergy*, vol. 35, n° 1, 2011, pp. 374-384.
- MELUN (F.). — Espèces ligneuses pour la production de biomasse : l'Eucalyptus. — Enerbio, Fondation Tuck, FCBA, 2009. — 4 p.
- ONF. — Prix moyens des bois sur pied aux ventes d'automne, toutes forêts publiques, de 1989 à 2014 en euros courants. — Paris : ONF, 2014a. — 1 p.
- ONF. — Projet ICIF : évaluation d'Itinéraires de Cultures Innovantes en Forêt pour la production de biomasse. — Fontainebleau : ONF, 2014b. — 35 p. (Rapport de l'installation du dispositif expérimental dans les Ardennes. Projet ICIF, financement ADEME et BPI-Oséo).
- PEYRON (J.-L.), TERREAUX (J.-P.), CALVET (P.), GUO (B.). — Principaux critères économiques de gestion des forêts : analyse critique et comparative. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 55, n° 5, 1998, pp. 523-551.
- SARDIN (T.). — Douglasaies françaises — Travaux sylvicoles et Itinéraires Techniques de Travaux Sylvicoles. — Paris : ONF, 2012. — 54 p.
- SARDIN (T.), CANTELOUP (D.). — Guide de sylviculture du Pin maritime de Lande. — Toulouse : ONF Direction territoriale Sud-Ouest, 2003. — 54 p.
- SARDIN (T.), LELOU (D.). — Référentiels sylvicoles : Pessières de l'Ardenne primaire. — Paris : ONF, 2013. — 34 p.
- SARDIN (T.), MOTHE (F.). — Comparaison économique des itinéraires sylvicoles en chênaie sessiliflore continentale. — *Rendez-Vous techniques de l'ONF*, hors-série "Sylviculture des chênaies dans les forêts publiques françaises", 2010, pp. 21-29.
- TERREAUX (J.-P.). — Principes de gestion des investissements en forêt. — Toulouse : Université de Toulouse I, 1989. — 374 p. (Thèse de doctorat en sciences économiques).
- VANDENHOVE (H.), GOOR (F.), O'BRIEN (S.), GREBENKOV (A.), TIMOFEYEV (S.). — Economic viability of short rotation coppice for energy production for reuse of caesium-contaminated land in Belarus. — *Biomass Bioenergy*, vol. 22, n° 6, 2002, pp. 421-431.

ANNEXE 1

Classes de fertilité pour chacune des essences

Tableau des classes de fertilité par essence, selon la hauteur dominante (H_0) atteinte à un âge de référence

Fertilité	H_0 (m) à 100 ans		H_0 (m) à 40 ans
	Douglas	Épicéa	Pin maritime
Bonne (F1)	60	37,5	25
Moyenne (F2)	51	35	23,5
Faible (F3)	42	32,5	21,75

ANNEXE 2

Les itinéraires analysés

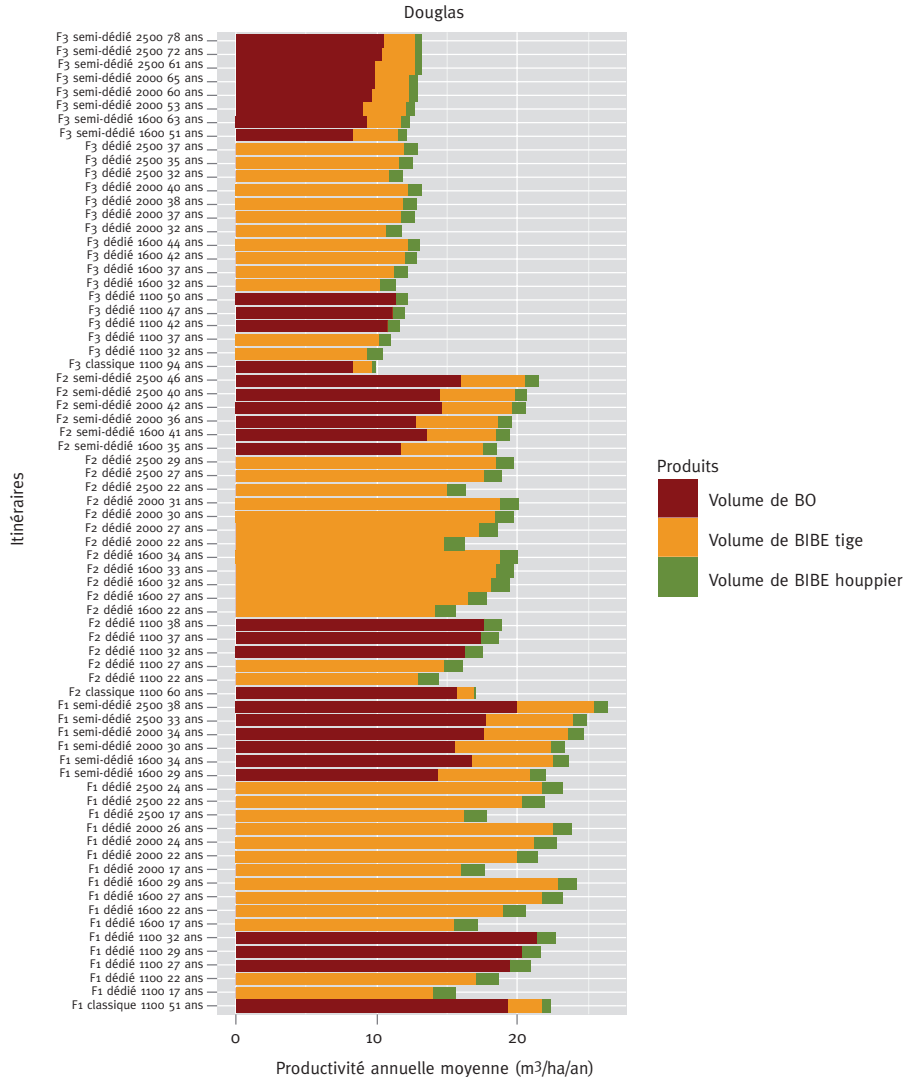
Tableau récapitulatif de la révolution (en années) des itinéraires sylvicoles analysés par essence, classe de fertilité, type d'itinéraire et densité de plantation (nombre de tiges/ha).

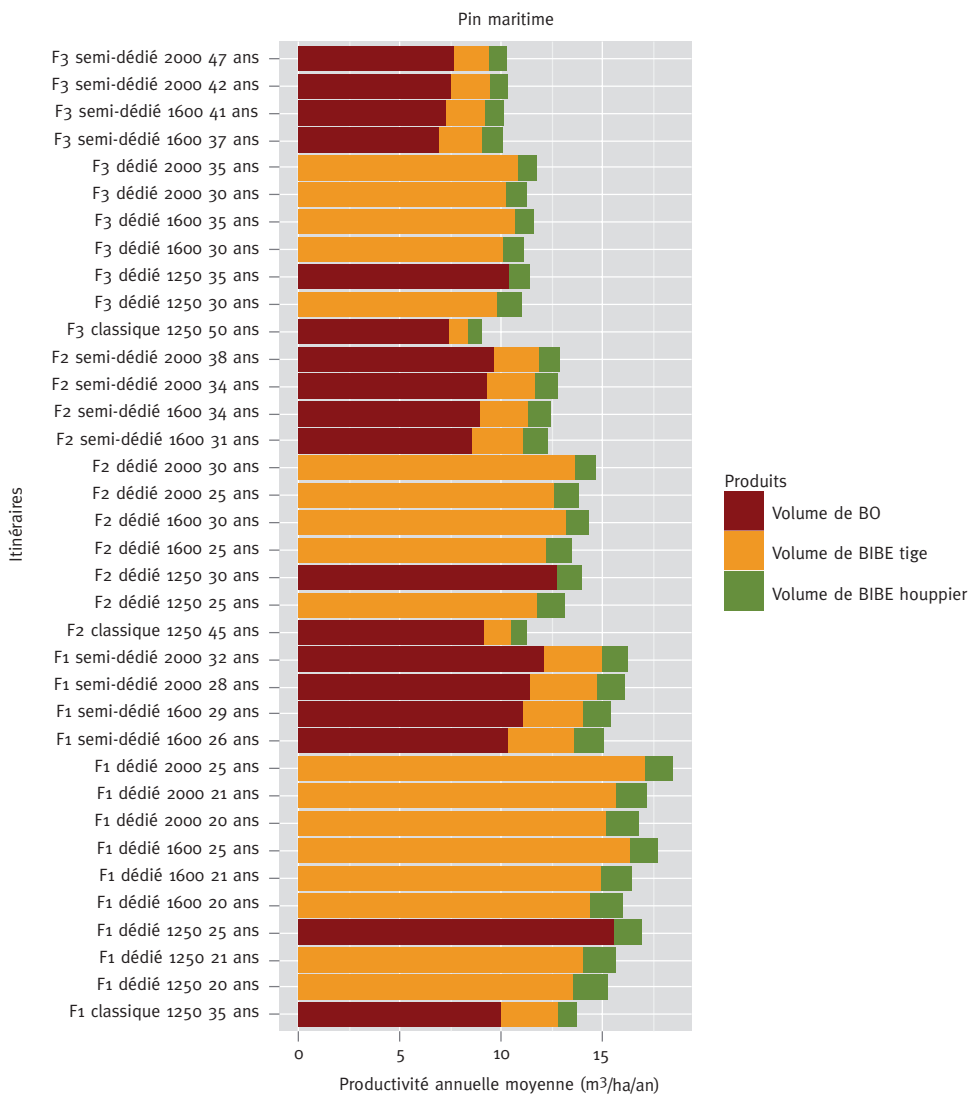
Les détails sont donnés par Berthelot *et al.* (2014).

Essence et fertilité	Type d'itinéraire et densité de plantation									Nombre d'itinéraires
	Classique	Dédié					Semi-dédié			
Douglas	1 100	1 100	1 250	1 600	2 000	2 500	1 600	2 000	2 500	
F1	51	17, 22, 27, 29, 32		17, 22, 27, 29	17, 22, 24, 26	17, 22, 24	32, 37	33, 37	33, 38	23
F2	60	22, 27, 32, 37, 38		22, 27, 32, 33, 34	22, 27, 30, 31	22, 27, 29	35, 41	36, 42	40, 46	24
F3	94	32, 37, 42, 47, 50		32, 37, 42, 44	32, 37, 38, 40	32, 35, 37	51, 63	53, 60, 65	61, 72, 78	25
Épicéa	1 600									
F1	57			18, 23, 28, 31, 33	18, 23, 28, 29, 31	18, 23, 27, 29		44, 52	46, 56	19
F2	67			25, 28, 33, 38, 41	25, 28, 33, 36, 39	25, 28, 33, 34, 37		52, 57, 62	54, 60, 65	22
Pin maritime	1 250									
F1	35		20, 21, 25	20, 21, 25	20, 21, 25		26, 29	28, 32		14
F2	45		25, 30	25, 30	25, 30		31, 34	34, 38		11
F3	50		30, 35	30, 35	30, 35		37, 41	42, 47		11
Nombre d'itinéraires	8	15	7	30	29	18	12	18	12	149

ANNEXE 3 Production de BO, BIBE et houppiers pour le Douglas et le Pin maritime

Production de BO, BIBE et houppiers des différents itinéraires pour le Douglas et le Pin maritime, en production annuelle moyenne (m³/ha/an). Chaque itinéraire est renseigné par sa fertilité (F1, F2, F3), le type d'itinéraire (classique, dédié, semi-dédié), la densité de plantation (nombre de tiges/ha), la durée de révolution (en années).





ANNEXE 4

Les critères de rentabilité

• Le bénéfice actualisé sur une séquence (BAS)

C'est l'équivalent actuel (à l'âge 0 du peuplement) du profit réalisé sur n années pour une révolution. Il s'agit de la différence entre l'ensemble des recettes actualisées et des coûts actualisés durant toute la durée de la révolution qui peuvent être des flux monétaires ponctuels ou récurrents. Le BAS est exprimé en euros par hectare et se calcule par la formule suivante :

$$BAS = \sum_{t=0}^n \frac{P_{BIBE} \cdot V_{BIBE}(t) + p \cdot V(t) - c(t)}{(1+r)^t} + \sum_{t=0}^n \frac{Ra - Ca}{(1+r)^t}$$

où :

t : âge du peuplement, variant de 0 à n .

P_{BIBE} : prix du BIBE (€/m³) qui inclut le bois fort tige dont le diamètre est inférieur à 225 cm et les houppiers.

$V_{BIBE}(t)$: volume de houppier enlevé à la coupe (m³/ha).

p : prix du bois d'œuvre (BO) sur pied qui est une fonction variable selon les essences et le volume unitaire moyen, sans prise en compte des coûts d'exploitation (euros/m³).

$V(t)$: volume total de BO mobilisé à chaque date de coupe qui dépend de l'âge t du peuplement, de la gestion sylvicole envisagée et de la croissance du peuplement. Ce volume est calculé par les modèles de croissance (m³/ha).

$c(t)$: coûts liés aux travaux sylvicoles selon l'âge t du peuplement. Il s'agit d'un coût moyen qui inclut les coûts de la main-d'œuvre, des machines ou des intrants... (€/ha).

Ra : recettes annuelles (non liées aux itinéraires de sylviculture) qui peuvent provenir des recettes autres que le bois : potentiellement un revenu de la chasse ou une subvention... (€/ha/an).

Ca : coûts annuels (hors itinéraires de sylviculture) qui sont des dépenses récurrentes comme les frais de gestion, la taxe foncière, les primes d'assurance, les frais de gardiennage... (€/ha/an).

r : taux d'actualisation. Son utilisation est nécessaire car les différentes recettes et coûts n'interviennent pas la même année.

• Le bénéfice actualisé en séquence infinie (BASi)

Le BASi se base sur l'hypothèse qu'à la fin d'une révolution, il y en a une nouvelle qui redémarre et la gestion sylvicole peut continuer ainsi à l'infini. Pour avoir le bénéfice actualisé en séquence infinie (BASi) exprimée en euros/ha, il faut multiplier le BAS par le terme $(1+r)^n / ((1+r)^n - 1)$, ce qui donne :

$$BASi = BAS \frac{(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

Cette formule provient des travaux de Faustmann (1849).

• Le taux de rentabilité interne (TIR)

Le taux interne de rentabilité exprimé en % est le taux d'actualisation qui annule le BASi (Peyron *et al.*, 1998). On peut l'assimiler à un taux d'intérêt qui permet d'évaluer la performance de l'investissement financier placé dans les travaux sylvicoles. Ce critère économique permet de s'affranchir

de la difficulté de choisir un taux d'actualisation et de faire une comparaison simplifiée avec les investissements non forestiers.

• L'annuité constante équivalente (ACE)

Ce critère correspond au montant des intérêts annuels du placement qui se calcule en multipliant le bénéfice net actualisé (BAS) au taux de rentabilité interne (TIR). Ce critère permet de comparer facilement la rentabilité en forêt sur de longues périodes avec celle des cultures annuelles (Bigot de Morogues *et al.*, 2011).

Lorsque les valeurs de BAS, BASI ou ACE sont positives, l'investissement est considéré comme rentable. Pour le TIR, les résultats peuvent être considérés comme intéressants lorsqu'il est supérieur au taux de rémunération d'un capital investi sur une même durée ; par exemple un placement financier, le taux de la Caisse d'Épargne... Il faut noter l'absence de prise en compte du risque dans cette analyse.

PLANTATIONS RÉSINEUSES EN CONDITIONS FORESTIÈRES : ANALYSE ÉCONOMIQUE DES ITINÉRAIRES DÉDIÉS ET SEMI-DÉDIÉS POUR AUGMENTER LA PRODUCTION DE BOIS (Résumé)

Pour répondre à une demande croissante en bois, en particulier résineux, les auteurs étudient de nouveaux itinéraires sylvicoles en plantation pour 3 essences : le Douglas, l'Épicéa et le Pin maritime. Ces itinéraires visent une production spécialisée soit exclusivement en bois d'industrie et bois énergie (BIBE), soit un mixte BIBE et bois d'œuvre (BO) de diamètre moyen. De tels itinéraires sont déjà référencés pour les feuillus, plutôt sur terrains agricoles fertiles. En contexte forestier moins fertile, les résineux présentent un potentiel de production ligneuse intéressant, mais dont les itinéraires spécialisés, et leur rentabilité économique, restent à étudier. L'article présente le travail original réalisé pour construire et simuler les productions associées aux résultats économiques de nouveaux itinéraires potentiels, en faisant varier les densités de plantation, les durées de révolution, les niveaux de fertilité, à partir de données du réseau d'essais FCBA et à l'aide de modèles de croissance du FCBA (Oasis pour Épicéa et Douglas ; Sylveco pour Pin maritime). Les données économiques proviennent des statistiques des ventes de bois et des coûts de travaux et de gestion de l'ONF sur la période 2012-2015. Les simulations économiques ont été réalisées avec le module Economics développé par FCBA et ONF sur la plateforme Capsis dans le cadre du projet ICIF (Futuro). Les analyses montrent que par rapport aux itinéraires classiques, ces itinéraires augmentent en général la productivité mais restent moins rentables dans les hypothèses économiques actuelles, avec cependant des résultats différenciés selon l'essence, la fertilité et l'itinéraire. Les résultats de l'étude de sensibilité montrent que les variations des prix du bois pourraient moduler le classement des performances entre les itinéraires classiques et spécialisés.

CONIFEROUS TREE PLANTATIONS IN FOREST CONDITIONS – ECONOMIC ANALYSIS OF DEDICATED AND SEMI-DEDICATED PATHWAYS TO INCREASE WOOD PRODUCTION (Abstract)

To meet growing demand for wood, particularly softwoods, the authors study a number of new silvicultural pathways for planting 3 species: Douglas fir, spruce and maritime pine. The goal of these pathways is to achieve specialised production of either industrial and workable timber, or a mixture of industrial and workable timber with medium-diameter workable timber. Pathways of this type have already been standardised for hardwoods, generally on fertile farmland. In a less fertile forest context, softwoods have a significant potential for woody production but specialised pathways and their profitability have yet to be studied. This article describes the innovative work being done to construct and simulate profitable production, new potential pathways, where plantation density, rotation time, the level of fertility are made to vary using the data from the FCBA test network in conjunction with the FCBA growth models (Oasis for spruce and Douglas fir, Sylveco for maritime pine). Economic data is derived from auction sales statistics and the ONF management and forestry work costs for the period 2012-2015. The Economics module developed by FCBA and ONF on the Capsis platform in the framework of the ICI project (Futuro) was used for the economic simulations. The analyses show that compared to conventional pathways, these pathways generally increase productivity but are nonetheless less profitable than current economic assumptions, although results vary according to species, fertility and the particular pathway. The sensitivity study shows that variations in the price of wood could alter the performance ratings as between conventional and specialised pathways.