

Analyse financière comparative
de deux approches de comptabilisation
du carbone appliquée à un projet
de boisement en territoire privé

Rédaction

Frank Muessenberger, ing. f., M. Sc., Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs

Collaboration

Claude Fortin, Direction du marché du carbone, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques; Yves Gauthier et Mélissa Lainesse, Bureau de mise en marché des bois; Marc Leblanc et Josée Pâquet, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs

Remerciements

Sylvie Delisle et Lyne Giasson

Production

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, Québec, octobre 2017

Pour plus de renseignements

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
5700, 4^e Avenue Ouest
Québec (Québec) G1H 6R1
Téléphone : 418 627-8609
Télécopieur : 418 643-0720
Courriel : services.clientele@mffp.gouv.qc.ca
Site Web : <http://www.mffp.gouv.qc.ca/>

DAEF-0388

Cette publication, conçue pour une impression recto verso, est accessible en ligne à l'adresse suivante : <http://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/approches-comptabilisation-carbone.pdf>.

Référence : Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (2017). *Analyse financière comparative de deux approches de comptabilisation du carbone appliquée à un projet de boisement en territoire privé*, Québec, gouvernement du Québec, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, 35 p.

Mots clés : analyse financière, changement climatique, comptabilisation du carbone, approche ex ante, approche ex post

Keywords: financial analysis, climate change, carbon sequestration and accounting, ex post approach, ex ante approach

© Gouvernement du Québec

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2017

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2017

ISBN : 978-2-550-79363-2

Sommaire

Au Québec, la lutte contre les changements climatiques est un enjeu prioritaire. En 2013, afin de contribuer à la réduction des gaz à effet de serre (GES), le Gouvernement du Québec a mis sur pied un système de plafonnement et d'échange de droits d'émissions (SPEDE) de GES (marché du carbone). Il a également mis en place un volet qui permet aux projets de réduction de GES et de séquestration de carbone non couverts par le SPEDE d'être admissibles à la délivrance de crédits compensatoires (CrC).

Pour que le secteur forestier et agricole y soit admissible, le Québec a développé un protocole dont l'approche novatrice et rigoureuse permet de convertir une quantité de carbone séquestré donnée en crédits compensatoires. Le boisement et le reboisement en territoire privé sont les premières activités du secteur forestier admissibles à la délivrance de ces crédits. L'approche de comptabilisation du carbone proposée dans le protocole québécois est de type *ex post*. Cette approche considère l'effet positif produit sur le bilan énergétique planétaire par la durée de séquestration d'une quantité de carbone mesurée. Elle se distingue de celle de type *ex ante* qui tient compte des tonnes de carbone nettes accumulées avec le temps et qui est communément utilisée dans différents programmes sur le marché du carbone volontaire ou réglementaire. La rentabilité financière des projets de séquestration de carbone n'a pas encore été abordée en profondeur sous l'angle de la comptabilisation du carbone séquestré. Pour pallier cette lacune, le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs a procédé à une analyse financière comparative entre ces deux approches de comptabilisation du carbone. Ce document présente la méthode d'analyse financière comparative, les résultats et une discussion sur ceux-ci. L'analyse a été faite en considérant le point de vue d'un promoteur et d'un propriétaire de terres à boiser.

Dans le but de mesurer l'impact financier des deux approches de quantification du carbone (*ex post* et *ex ante*) sur un projet de boisement en territoire privé, les flux monétaires considérés sont ceux liés à l'aménagement forestier (investissements directement liés à la planification et aux opérations sylvicoles), à l'aide financière accordée aux propriétaires (boisement et entretien des plantations) et à la gestion du carbone (estimation, suivi et mise en marché de crédits compensatoires). Les méthodes de calcul du carbone séquestré utilisées dans les deux approches ont été soumises à des scénarios de référence semblables. Les mêmes hypothèses ont été retenues ce qui minimise les risques de biais lors de l'analyse comparative.

Deux indicateurs ont été utilisés pour mesurer la rentabilité d'un projet : la valeur actuelle nette (VAN) et l'indice de profitabilité (IP). Le premier indicateur, la valeur actuelle nette, permet d'actualiser les coûts et les revenus du projet. Le deuxième indicateur, l'indice de profitabilité, compare la somme des revenus d'exploitation actualisés de chaque année à la somme de tous les investissements pour le projet. Un test de sensibilité a également été réalisé afin d'observer l'effet du prix du carbone et de la superficie du projet sur la rentabilité pour chacune des deux approches.

L'approche *ex post* présente certains avantages et inconvénients :

- Le seuil de rentabilité est atteint plus rapidement avec cette approche sur de petites superficies. De façon générale, les superficies susceptibles de faire l'objet d'un projet de boisement et de reboisement sont de plus petite taille au Québec.
- Puisque l'approche *ex post* n'exige ni contrôle récurrent ni suivi, elle laisse entrevoir une plus grande rentabilité, et ce, malgré un nombre de crédits compensatoires délivrés plus faible.

- Après la vente de crédits compensatoires, il n'y a plus aucune exigence de maintien du carbone dans la biomasse.
- La valeur du terrain pourrait être augmentée grâce à l'option de vente des crédits compensatoires.
- L'usage et l'accessibilité d'un territoire ne sont pas limités par l'approche *ex post*. Cette dernière donne plus de latitude au promoteur, puisque la gestion forestière est indépendante de la gestion du carbone.
- Étant donné que cette approche, caractérisée par le principe de tonnes métriques par année, rémunère l'effet passé d'une séquestration de carbone, l'accumulation de crédits compensatoires prend plus de temps, ce qui a pour conséquence que les revenus associés à leur délivrance surviennent plus tard dans la vie du projet. Toutefois, en actualisant ces revenus, leur effet dans l'équilibre budgétaire est moins élevé.

En conclusion, indépendamment de l'approche utilisée pour délivrer un crédit compensatoire, l'étude démontre que les projets de séquestration du carbone qui consistent à boiser des friches nécessitent un investissement initial élevé de la part du promoteur, autant pour la partie sylvicole que pour la partie carbone. L'obligation de maintenir chaque quantité de carbone récompensé par un crédit compensatoire hors de l'atmosphère représente le principal défi à la mise en place de projets de ce type. Avec l'approche *ex post*, pour que les projets de boisement et de reboisement soient suffisamment attrayants, il faudra que les coûts initiaux liés à l'inventaire, à la validation par une tierce personne et au plan de projet diminuent. Pour qu'un projet de boisement présente un intérêt pour le promoteur et le propriétaire, la vente des crédits compensatoires doit être vue comme un revenu d'appoint qui s'ajoute au revenu principal provenant de la récolte du bois.

Table des matières

Introduction	1
1. Séquestration et comptabilisation du carbone	3
2. Méthode d'analyse financière comparative.....	4
2.1 Intrants de l'analyse financière.....	4
2.2 Coûts	5
2.3 Revenus.....	6
2.4 Indicateurs de rentabilité de projets.....	8
2.5 Test de sensibilité	9
3. Résultats	10
3.1 Scénario de référence (approches ex post et ex ante)	10
3.2 Scénario de projet (approches ex post et ex ante)	10
3.3 Estimation des crédits compensatoires	13
3.4 Revenus.....	13
3.5 Rentabilité du projet	14
3.6 Test de sensibilité	16
4. Discussion.....	18
4.1 Aspect du carbone lié aux méthodes de comptabilisation	18
4.2 Aspects financiers.....	19
4.3 Différences entre les deux approches	20
4.4 Avantages de l'approche ex post	22
4.5 Inconvénients de l'approche ex post	22
Conclusion	23
Annexe Hypothèses retenues pour l'analyse comparative entre l'approche ex post et l'approche ex ante	25
Bibliographie	33

Liste des tableaux

Tableau 1	Comparaison entre le coût des traitements sylvicoles retenus pour l'analyse et l'aide financière accordée.....	5
Tableau 2	Coûts de récolte en fonction de la dimension des tiges récoltées.....	5
Tableau 3	Coûts fixes pour un projet de boisement d'une superficie de 10 ha, leur récurrence et l'attribution au volet Forestier et au volet Carbone selon les approches ex post et ex ante	6
Tableau 4	Prix au mètre cube du bois récolté en fonction de la dimension des tiges	7
Tableau 5	Prix moyen du bois estimé pour l'année de récolte en fonction des proportions par classe de DHP moyen récolté	7
Tableau 6	Comptabilisation du carbone contenu dans les produits forestiers ligneux selon les approches ex post et ex ante	12
Tableau 7	Quantité de carbone associée aux différents réservoirs pour une friche herbacée ayant une régénération en feuillus de faible densité	26
Tableau 8	Scénarios sylvicoles appliqués dans chacun des blocs de récolte pour les approches ex post et ex ante	28
Tableau 9	Proportion (en %) des produits forestiers ligneux en fonction de l'âge de l'éclaircie ou de la coupe finale de la plantation (modèle USINE) et du diamètre à hauteur de poitrine	29
Tableau 10	Facteurs de rétention du carbone en fonction de la catégorie de produits forestiers ligneux pour une période de 100 ans avec l'approche ex ante.....	30
Tableau 11	Facteurs de séquestration du carbone dans les produits forestiers ligneux sur une période de 100 ans et demi-vie par produit servant à l'estimation du bilan annuel de carbone pour l'approche ex post.....	30

Liste des figures

Figure 1	Évolution du taux dégressif de 4 % pour des projets forestiers sur terres publiques au Québec.....	9
Figure 2	Évolution de l'accumulation de carbone, excluant le carbone du sol et de la litière, dans la friche de faible densité utilisée dans le scénario de référence	10
Figure 3	Influence du scénario sylvicole sur 160 ans d'évolution du carbone dans la plantation	11
Figure 4	Carbone contenu dans les produits forestiers ligneux selon les approches ex post et ex ante.....	12
Figure 5	Quantité de crédits compensatoires mis en vente au cours de la durée d'un projet selon l'approche ex post et ex ante.....	13

Figure 6	Quantité de carbone et flux monétaires actualisés (Aménagement forestier, Carbone et Aide financière), regroupés par période de 10 ans pour les approches : a) ex post et b) ex ante	14
Figure 7	Valeur actuelle nette de deux approches de calcul de crédits compensatoires basé sur le prix de 18 \$/tCO ₂ eq et d'une superficie de projet de 10 ha	15
Figure 8	Indice de profitabilité du projet basé sur les flux associés aux volets Aménagement forestier, Aide financière et Gestion du carbone pour les approches ex post et ex ante	16
Figure 9	Seuils de rentabilité pour les approches ex post et ex ante en fonction de la superficie et du prix de la tonne de CO ₂ eq (\$ CAN)	17
Figure 10	Équivalence financière entre les approches ex post et ex ante	18
Figure 11	Courbe de rendement pour une friche feuillue de faible densité dans la végétation potentielle MS_ de la région écologique 4f	26
Figure 12	Courbe de rendement du volume marchand d'une plantation d'épinette blanche ayant une densité de 2 000 plants/ha et un IQS de 10 m à 25 ans.....	27

Introduction

Au Québec, la lutte contre les changements climatiques est un enjeu prioritaire. En 2013, afin de contribuer à la réduction des gaz à effet de serre (GES), le Québec a mis sur pied un système de plafonnement et d'échange de droits d'émissions (SPEDE) de GES. Un an plus tard, il liait son système à celui de la Californie dans le cadre de la Western Climate Initiative (WCI), créant ainsi le plus grand marché réglementé du carbone en Amérique du Nord. Ce dernier est appelé à s'élargir, puisque l'Ontario a lancé son marché du carbone le 1^{er} janvier 2017 dans le but de le lier au marché Québec-Californie dès 2018 (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2017).

Parallèlement au marché du carbone québécois, le gouvernement du Québec a mis en place le volet des crédits compensatoires (CrC). Ce volet rend des projets de réduction de GES et de séquestration de carbone qui ne sont pas couverts par le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre admissibles à la délivrance de crédits compensatoires. Un crédit compensatoire représente une tonne métrique d'équivalent CO₂ réduite ou séquestrée. Les crédits ainsi générés peuvent être vendus sur le marché du carbone et utilisés par un émetteur pour couvrir une partie de ses émissions de GES déclarées et vérifiées au cours d'une période de conformité.

Actuellement, le Règlement concernant le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre ne reconnaît pas les activités de séquestration biologiques ou géologiques de carbone. Pour pallier ce problème et rendre le secteur forestier et agricole admissible à la délivrance de crédits compensatoires, le Québec a développé un protocole dont l'approche novatrice et rigoureuse permet de convertir une quantité de carbone séquestré donnée en crédits compensatoires. Le boisement et le reboisement en territoire privé sont les premières activités du secteur forestier admissibles à la délivrance de crédits compensatoires. L'approche de comptabilisation du carbone proposée dans le protocole québécois est de type *ex post* et se distingue de celle de type *ex ante*, communément utilisée dans différents programmes sur le marché du carbone volontaire ou réglementaire.

Les difficultés conceptuelles et opérationnelles qui empêchent la mise en place d'un projet de crédits compensatoires pour la séquestration de carbone en milieu forestier sont nombreuses et restreignent le retour sur l'investissement d'un promoteur. La rentabilité financière des projets de séquestration de carbone n'a pas encore été abordée en profondeur sous l'angle de la comptabilisation du carbone séquestré. Pour pallier cette lacune, le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs a procédé à une analyse financière comparative entre deux approches de comptabilisation du carbone.

Ce document présente la méthode d'analyse financière comparative, les résultats et une discussion sur ceux-ci. L'analyse a été faite en considérant le point de vue d'un promoteur et d'un propriétaire de terres à boiser.

1. Séquestration et comptabilisation du carbone

La séquestration du carbone a pour effet de maintenir une quantité de CO₂ hors de l'atmosphère pendant une période de temps donnée. Dépendamment de la quantité de carbone qui est séquestré, les effets sur le bilan énergétique de la terre pourront être positifs (réchauffant) ou négatifs (refroidissant). Dans un programme de crédits compensatoires, quantifier la séquestration du carbone comporte deux étapes : il faut mesurer ou estimer le carbone présent dans les différents réservoirs de carbone à l'intérieur des limites géographiques d'un projet et calculer le nombre de crédits compensatoires pouvant être mis sur le marché du carbone. Les approches *ex post* et *ex ante* présentées dans cette étude diffèrent quant au calcul menant à un crédit compensatoire.

Approche *ex post*

L'approche *ex post*, développée au Québec et utilisée dans le *Protocole de crédits compensatoires pour les projets de séquestration de carbone en territoire privé québécois – Activités : boisement et reboisement 0.1* (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, à paraître), considère l'effet positif produit sur le bilan énergétique planétaire par la durée de séquestration d'une quantité de carbone mesurée (principe de tonnes métriques par année).

L'impact sur le bilan énergétique est comptabilisé chaque année sur une période de référence de 100 ans. Cette période répond aux exigences du critère de permanence tel qu'il a été défini par la Western Climate Initiative (2010). Ainsi, l'effet de réchauffement évité par le carbone séquestré est comptabilisé lorsque la séquestration a lieu. Dans ce cas, la quantité de carbone séquestré et la durée de séquestration sont comptabilisées. Cela permet de quantifier l'impact réel du carbone séquestré sur l'environnement à partir du moment où la séquestration a lieu et pour la durée pendant laquelle elle a lieu. Un inventaire de la biomasse à la fin de chaque période de délivrance de crédits compensatoires est fait afin de produire un bilan de l'effet réel de la séquestration du carbone. Tenir compte du bilan énergétique dans la comptabilisation élimine les exigences qui pourraient être imposées après la délivrance des crédits compensatoires. L'approche *ex post* offre de la latitude au gestionnaire forestier, puisqu'elle permet de séparer la gestion forestière de la gestion du carbone dans un projet de séquestration.

Approche *ex ante*

L'approche *ex ante*, utilisée dans le protocole de séquestration de carbone en milieu forestier (California Environmental Protection Agency, 2014) tient compte des tonnes de carbone nettes qui ont été accumulées avec le temps. Pour que celles-ci soient converties en crédits compensatoires, elles doivent être soumises au critère de permanence (Carlson et autres, 2009; Western Climate Initiative, 2010; California Environmental Protection Agency, 2014). Ce dernier correspond au temps moyen généralement reconnu, soit 100 ans, pour qu'une unité de CO₂ séquestré ait compensé en grande partie l'émission d'une unité équivalente de CO₂. La gestion du critère de permanence implique différentes contraintes opérationnelles et techniques telles que le maintien physique du carbone pendant 100 ans après la délivrance d'un crédit compensatoire et la mise en place d'un fonds de réserve pour la gestion du risque d'inversion du carbone séquestré. Pour cela, une partie des crédits compensatoires devra être mise dans un fonds de réserve servant de garantie contre les risques d'inversion. La gestion de risque d'inversion est donc implicite dans l'approche de quantification *ex ante*.

Étant donné que l'approche *ex ante* convertit les tonnes de carbone accumulées et non leur effet sur le réchauffement, un grand nombre de crédits compensatoires sera délivré relativement tôt dans la vie du projet. Toutefois, afin de se conformer au critère de permanence, tel qu'il a été défini par les partenaires de la WCI, et dans le but de contribuer à un effet d'atténuation, cette approche exige que le carbone reste hors de l'atmosphère pendant une période de 100 ans. En conséquence, le projet sera poursuivi pendant 100 ans après la date de vente du dernier crédit compensatoire. Le maintien du carbone dans la biomasse durant cette période satisfait ainsi au critère de permanence. Afin d'en assurer le respect, ainsi que l'intégrité environnementale du marché du carbone qui reconnaît ces crédits compensatoires, il est nécessaire de procéder à des contrôles et à des suivis. Cela occasionne des coûts importants qui auront un impact sur la rentabilité des projets. Étant donné que l'approche *ex ante* tient compte des tonnes de carbone, et non de leur effet sur le climat, et que le carbone n'est pas séparé de la matière ligneuse, elle ne permet pas de dissocier la gestion forestière de la gestion du carbone.

2. Méthode d'analyse financière comparative

Dans un projet de séquestration du carbone, l'analyse financière comparative entre l'approche *ex post* et l'approche *ex ante* se base sur les flux monétaires et les flux de carbone. Le territoire retenu pour l'analyse correspond à une plantation d'épinette blanche d'une superficie de 10 ha sur une friche agricole. Le choix d'une petite superficie permet de mieux refléter la situation au Québec. En effet, selon Côté et autres (2012), la taille moyenne des propriétés forestières privées est de 43 ha et le changement de propriétaire se fait aux 22 ans. Pour sa part, la taille moyenne des superficies de friches agricoles reboisées entre 2006 et 2012, qui a été estimée à partir des inventaires faits en forêt privée, est de l'ordre de un à cinq hectares.

L'analyse financière comparative a été basée sur les méthodes de calcul du carbone séquestré utilisées dans les approches *ex post* et *ex ante*. Ces dernières ont été soumises à des scénarios de référence semblables dans un projet de même durée, conforme à l'approche *ex ante* qui s'étend sur une période de 160 ans. Cela correspond à 60 ans d'accumulation de carbone dans la plantation et les produits ligneux, auxquels s'ajoutent les 100 ans de permanence exigés par l'approche. Le scénario sylvicole retenu est le même pour les deux approches (voir l'annexe).

2.1 Intrants de l'analyse financière

Dans le but de mesurer l'impact financier des deux approches de quantification du carbone sur un projet de boisement en territoire privé, les flux monétaires qui ont été considérés sont liés à l'aménagement forestier, à l'aide financière accordée aux propriétaires et à la gestion du carbone.

- **L'aménagement forestier** comprend tous les investissements directement liés à la planification et aux opérations sylvicoles (préparation du terrain, production et transport des plants, mise en terre des plants, dégagements, éclaircies précommerciale et commerciale et récolte), à la mise en marché des bois et aux taxes foncières.
- **L'aide financière accordée aux propriétaires** qui a été considérée est liée au boisement et à l'entretien des plantations.
- **La gestion du carbone** englobe les flux monétaires directement attribuables à la partie sur l'estimation, le suivi et la mise en marché de crédits compensatoires. À cela s'ajoutent les coûts attribuables à des contrats notariés, indispensables au respect du critère de permanence de l'approche *ex ante*.

2.2 Coûts

Les coûts des traitements sylvicoles retenus aux fins de l'analyse comparative, à l'exclusion des coûts de récolte, sont présentés dans le tableau 1. Les propriétaires de forêt privée participent à 20 % des coûts des traitements, 80 % étant couvert par l'aide sylvicole.

Tableau 1 Comparaison entre le coût des traitements sylvicoles retenus pour l'analyse et l'aide financière accordée

Traitement	Aide financière incluant l'exécution et la technique forestière ^a	Coût des traitements sylvicoles retenus aux fins de l'analyse
Production des plants et transport	1 047 \$	1 308 \$
Préparation de terrain	522 \$	653 \$
Mise en terre des plants	1 122 \$	1 403 \$
Désherbage	436 \$	545 \$
Dégagements 1 et 2	1 325 \$	1 395 \$
Éclaircie précommerciale (EPC)	1 109 \$	1 386 \$
Première éclaircie commerciale (EC)	1 295 \$	Voir tableau 7

a. Aide financière accordée aux propriétaires selon la *Grille annuelle de taux d'investissement en forêt privée pour l'année financière 2016-2017* (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2016).

Les coûts de récolte s'ajustent selon la dimension des tiges et proviennent du modèle d'évaluation de rentabilité des investissements sylvicoles (MÉRIS, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2015). Aux coûts de récolte s'ajoutent la réfection de la voirie forestière et le transport du bois. Les coûts de transport correspondent à la moyenne des tarifs de transport applicables dans le Bas-Saint-Laurent. Les coûts de réfection de la voirie sur les terres privées représentent 50 % des coûts en vigueur sur les terres publiques.

Tableau 2 Coûts de récolte en fonction de la dimension des tiges récoltées

Dimension des tiges récoltées (dm ³ /tige)	Récolte (\$/m ³)	Transport (\$/m ³)	Chemin (\$/m ³)
39	39,00	9,08	1,20
205	24,50	9,08	1,20
350	21,34	9,08	1,20
570	19,09	9,08	1,20
810	17,70	9,08	1,20
1 120	16,60	9,08	1,20
1 294	16,20	9,08	1,20
1 414	16,00	9,08	1,20
1 481	15,80	9,08	1,20

Le projet de séquestration contient des coûts fixes qui sont calculés pour une superficie boisée de 10 ha et ramenés à l'unité (tableau 3). Les taxes foncières sont remboursées en moyenne à 85 % si les coûts des travaux sylvicoles, entièrement déboursés par le propriétaire, sont

équivalents au montant des taxes. De plus, les coûts du plan d'aménagement forestier sont déductibles d'impôt dans la mesure où les revenus provenant de la forêt sont déclarés.

Tableau 3 Coûts fixes pour un projet de boisement d'une superficie de 10 ha, leur récurrence et l'attribution au volet Forestier et au volet Carbone selon les approches ex post et ex ante

Catégorie	Approches		Récurrence	Volet Forestier (\$/ha)	Volet Carbone (\$/ha)
	ex post	ex ante			
Inscription au système CITSS ^a	x	x	Unique		24,80
Enregistrement du projet	x	x	Unique		14,00
Renouvellement d'un projet	x	x	25 ans		7,00
Taxes foncières ^b	x	x	Annuelle	Jeunes plantations résineuses : 12,90 Vieilles plantations résineuses : 16,77	
Frais de notaire		x	30 ans		50,00
Assurance responsabilité	x	x	Annuelle	3,00	
Plan d'aménagement forestier	x	x	10 ans	60,00	
Rapport de plan de projet		x	Unique		1 365,00
Certification forestière		x	Annuelle		0,29
Inventaire biomasse		x	12 ans		350,00
Rapports de projet sur la quantité séquestrée		x	Annuelle		30,00
Vérification externe		x	6 ans		600,00
Rapport de plan de projet	x		Unique		945,00
Inventaire biomasse	x		Délivrance CrC ^c		350,00
Rapports de projet sur la quantité séquestrée	x		Délivrance CrC		450,00
Vérification	x		Délivrance CrC		600,00
Fonds de réserve		x	Délivrance CrC		21 % des CrC
Frais de courtage	x	x	Délivrance CrC		4 % de la valeur des CrC

a. CITSS : Compliance Instrument Tracking System Service

b. Taux utilisé par une municipalité du Bas-Saint-Laurent en 2015.

c. Délivrance CrC : Date, choisie par le promoteur du projet, à laquelle la quantité de crédits compensatoires lui sera délivrée.

2.3 Revenus

PRIX DU BOIS

Le prix du bois varie en fonction de l'essence, de la longueur de la grume et de son diamètre au fin bout. Les tables de rendement fournissent l'information sur le diamètre à hauteur de poitrine ainsi que sur la longueur des arbres (Prégent et autres, 2010). Le diamètre au fin bout est calculé à l'aide du défilement dont la valeur par défaut est de 1,6 cm/m (FPInnovation, 2009).

Les prix, établis en fonction de la dimension des grumes, sont tirés des listes de prix qui avaient cours pendant l'hiver 2016 dans les scieries du Bas-Saint-Laurent et de la Beauce (tableau 4). La longueur maximale de la tige est calculée jusqu'à un diamètre de plus de 10 cm au fin bout.

Tableau 4 Prix au mètre cube du bois récolté en fonction de la dimension des tiges

DHP moyen (cm)	Longueur maximale du bois marchand (m)	Volume moyen (dm ³ /tige)	\$/m ³
13	2,5	39	22,00
21	8	205	65,00
25	11	350	72,00
30	14	570	77,00
34	16	810	78,00
37	18	1 120	78,00
40	19	1 294	79,00
42	20	1 414	80,00
44	21	1 481	80,00

Le scénario sylvicole est planifié jusqu'à ce que les arbres aient atteint 160 ans. Dès leur 90^e année, où différents types d'interventions se superposent, la dimension moyenne des tiges est estimée et le prix de vente (\$/m³) est pondéré en conséquence. On obtient un prix pour chaque année de récolte (tableau 5). À titre d'exemple, pour un projet où l'âge des arbres est de 100 ans, 24 % du volume marchand récolté est composé d'arbres d'un DHP moyen de 12 cm, 20 % provient d'arbres d'un DHP moyen de 20 cm et 56 %, d'arbres de 42 cm de DHP moyen. À cet âge, le revenu moyen pour l'ensemble de la récolte s'élève à 57,81 \$ par m³.

Tableau 5 Prix moyen du bois estimé pour l'année de récolte en fonction des proportions par classe de DHP moyen récolté

\$/m ³	DHP moyen	Âge du projet													
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
22,00	12	100 %						16 %	24 %	17 %	5 %	11 %			83 %
65,00	20		100 %						20 %	40 %	6 %	40 %	2 %		27 %
72,00	26			100 %							14 %	49 %	9 %	17 %	
77,00	30				100 %						75 %				
78,00	34					100 %							89 %		
78,00	38						100 %								73 %
79,00	40							84 %							
80,00	42								56 %						
80,00	44									43 %					
Prix moyen du bois récolté (\$/m ³)		22,00	65,00	72,00	77,00	78,00	78,00	69,76	57,81	64,28	72,92	63,70	77,16	30,73	74,48

PRIX DU CRÉDIT DE CARBONE

Un crédit compensatoire équivaut à une tonne de CO₂ équivalent (tCO₂eq) et permet à son détenteur de compenser une émission de GES équivalente, soit une tonne de GES. Le prix de vente final selon le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (Gouvernement du Québec, 2016) est de 17,64 \$ CAN, valeur qui a été arrondie à 18 \$ aux fins de l'analyse. L'augmentation annuelle est estimée à 5 % au cours des quatre prochaines années. À celle-ci s'ajoute un taux d'inflation estimé à 2 % (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2016). Après cette période de quatre ans, on pose l'hypothèse conservatrice que le prix restera stable.

AIDE FINANCIÈRE ACCORDÉE AUX PROPRIÉTAIRES

Tout producteur forestier enregistré est admissible à une aide financière pour mettre un lot forestier (travaux techniques et d'exécution) en valeur. La grille tarifaire comporte un remboursement financier pour différents traitements sylvicoles. Le remboursement varie en fonction du type de traitement et s'élève à 80 % pour la plupart d'entre eux, mis à part les deux premiers dégagements où le remboursement est de 95 % du coût du traitement (tableau 1).

2.4 Indicateurs de rentabilité de projets

On utilise deux indicateurs pour mesurer la rentabilité d'un projet : la valeur actuelle nette (VAN) et l'indice de profitabilité (IP). Dans la présente analyse, les indices de rentabilité ne sont comparables qu'à condition d'attribuer une même période de temps aux deux approches de comptabilisation du carbone. Ces conditions sont respectées étant donné que la durée du projet s'étend sur une période de 160 ans (voir l'annexe).

Le premier indicateur, la valeur actuelle nette, permet d'actualiser les coûts et les revenus du projet. Un taux dégressif de 4 % est retenu. Celui-ci demeure stable pendant les 30 premières années, puis diminue de manière inversement exponentielle, visant une asymptote à 1 % (figure 1). Ce taux tient compte du temps (en nombre d'années) et de l'argent qui reflètera, d'une part, la jouissance immédiate et, d'autre part, l'aversion au risque (Lainesse et Auclair, 2013).

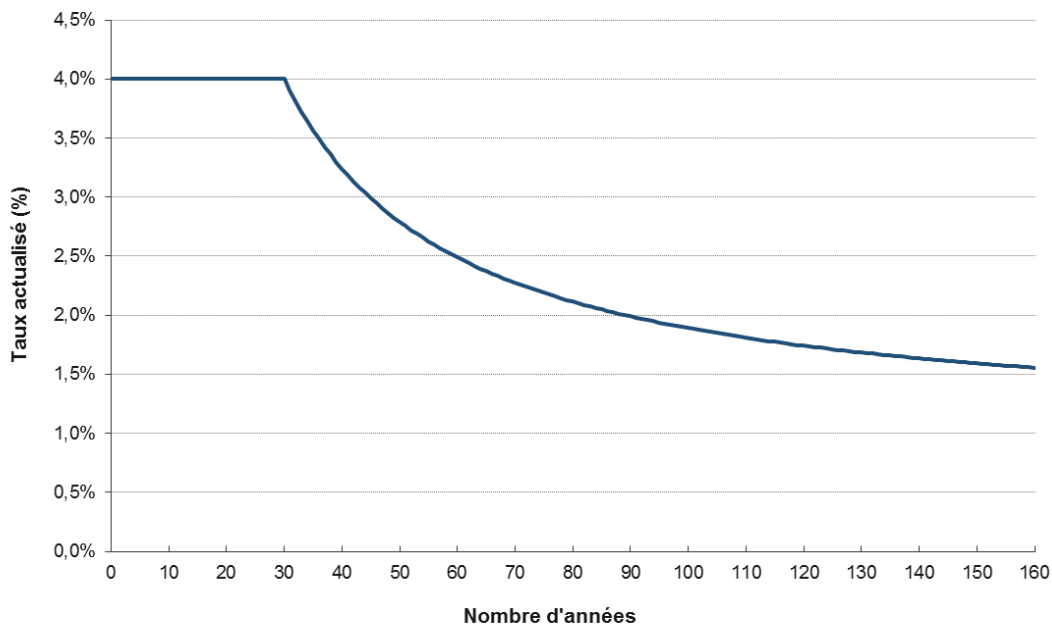


Figure 1 Évolution du taux dégressif de 4 % pour des projets forestiers sur des terres publiques au Québec

Le deuxième indicateur, l'indice de profitabilité, compare la somme des revenus d'exploitation actualisés de chaque année à la somme des investissements initiaux et de ceux qui apparaissent tout au long du projet. Plus l'indice de profitabilité est élevé, plus le projet est profitable. Il indique le retour attendu pour chaque dollar investi.

Aux fins d'analyse de la rentabilité et de comparaison, les flux monétaires sont regroupés comme ceci :

1. Projet qui inclut l'aménagement forestier, l'aide financière accordée aux propriétaires et la gestion du carbone.
2. Projet qui inclut l'aménagement forestier et la gestion du carbone.
3. Projet qui inclut uniquement la gestion du carbone.

2.5 Test de sensibilité

Le test de sensibilité consiste à observer l'effet du prix du carbone et de la superficie du projet sur sa rentabilité pour chacune des deux approches. Les valeurs utilisées varient entre 18 \$ CAN et 100 \$ CAN pour la tCO₂eq et entre 10 et 100 ha pour la superficie du projet. Seuls les coûts attribuables aux volets Aménagement forestier et Gestion du carbone (crédits compensatoires) sont pris en compte pour le test de sensibilité, puisqu'ils sont indispensables à ce projet de séquestration du carbone.

3. Résultats

3.1 Scénario de référence (approches ex post et ex ante)

L'accumulation totale de carbone dans la friche de faible densité ne tient compte que de la végétation observée au stade initial. Le carbone dans le sol et dans la litière n'est pas comptabilisé. À l'âge de 100 ans, la quantité de carbone atteint son état de saturation qui est de 40 tonnes de carbone/ha (tC/ha) (figure 2). Deux tiers de ce volume est attribuable à la biomasse vivante aérienne. Le carbone contenu dans la biomasse aérienne sert de seuil minimum à ne pas franchir dans le scénario de projet.

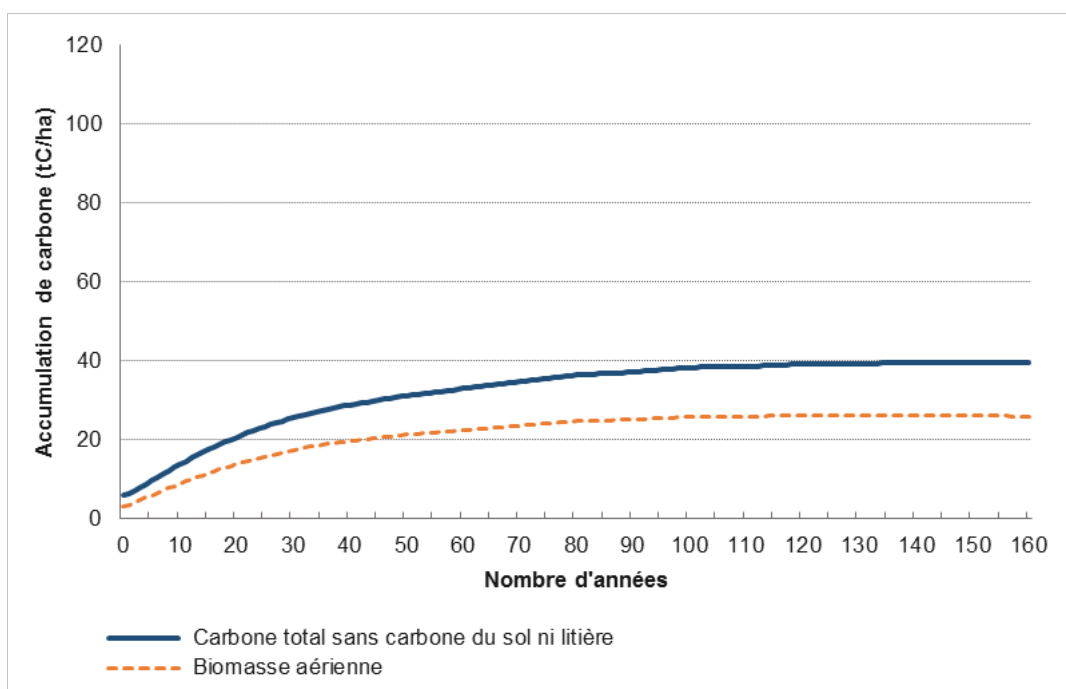


Figure 2 Évolution de l'accumulation de carbone, excluant le carbone du sol et de la litière, dans la friche de faible densité utilisée dans le scénario de référence

3.2 Scénario de projet (approches ex post et ex ante)

Le carbone cumulé dans le scénario de projet est présenté dans la figure 3. Une quantité maximale de 100 tC/ha est atteinte au bout de 59 ans, juste avant la première récolte partielle. Par la suite, le réservoir de carbone atteint son minimum de 40 tC/ha à 90 ans, en raison des récoltes qui ont été faites, respectant ainsi le seuil établi dans le scénario de référence. Dès l'âge de 90 ans, la seconde génération de la plantation remplit progressivement le réservoir de la biomasse vivante. La quantité de carbone après l'âge de 90 ans se maintient entre 50 et 90 tC/ha suivant l'intensité des récoltes. La biomasse morte (excluant la litière et le carbone dans le sol), qui représente la différence entre le carbone total et celui que l'on attribue à la biomasse vivante, croît progressivement avec l'âge de la plantation. Ce réservoir n'est que faiblement influencé par les interventions.

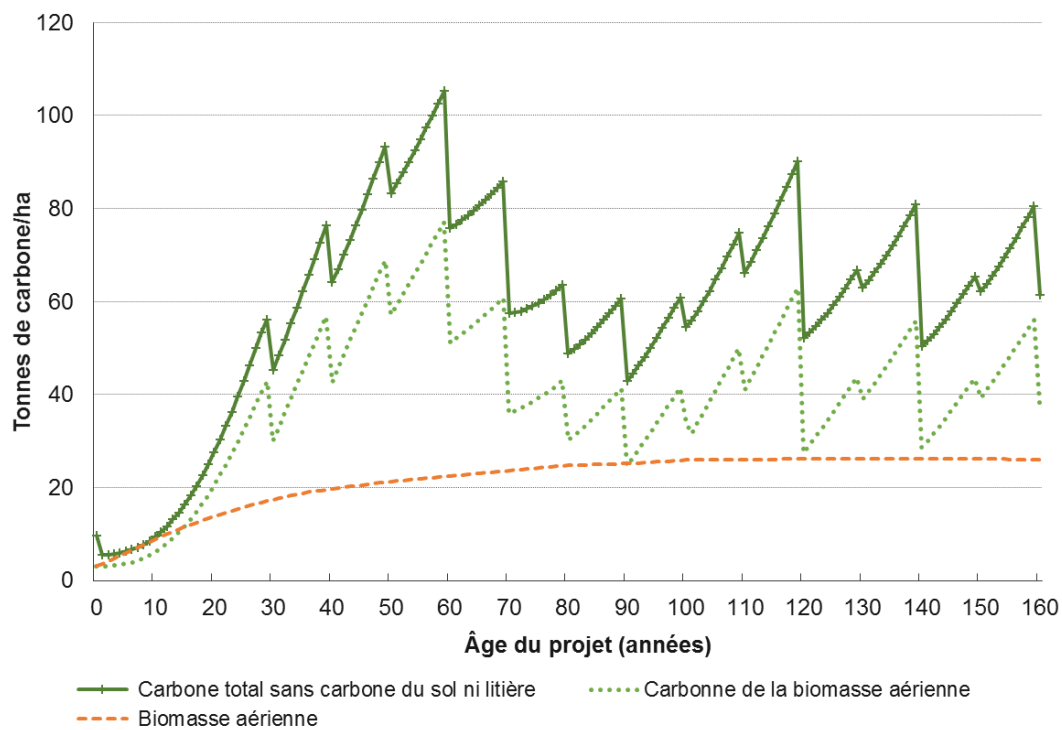


Figure 3 Influence du scénario sylvicole sur 160 ans d'évolution du carbone dans la plantation

Le carbone contenu dans les produits forestiers ligneux est comptabilisé différemment selon les deux approches (tableau 6). Pour l'approche *ex ante*, le contenu en carbone de chacun des produits forestiers ligneux reste stable tout au long de la vie. La quantification du carbone contenu dans les produits forestiers ligneux pour l'approche *ex post* prend en compte une valeur annuelle du contenu en carbone qui diminue continuellement. L'évolution du carbone dans les produits forestiers ligneux se compose de la somme des courbes de vie de chaque produit forestier ligneux. La forte dégression après la récolte menant à une forme en dent de scie est due à une présence élevée de produits forestiers ligneux de courte durée tels que le papier et le bois de chauffage (figure 4).

En comparant les approches, l'approche *ex ante* a en général des valeurs légèrement inférieures à celles estimées pour l'approche *ex post*. Cela est dû à la demi-vie qui varie selon l'approche employée (voir tableaux 10 et 11 en annexe). L'approche *ex ante* montre une accumulation de carbone jusqu'à l'âge de 120 ans, date à laquelle un équilibre est atteint entre l'approvisionnement du réservoir des produits forestiers ligneux et la fin de vie des premiers produits forestiers ligneux. Cet équilibre se situe entre 25 et 30 tC/ha.

Tableau 6 Comptabilisation du carbone contenu dans les produits forestiers ligneux selon les approches ex post et ex ante

Période du projet (ans)	Volume récolté (m³/ha)	Volume récolté converti en carbone (tC/ha)	Carbone contenu dans les produits forestiers ligneux (tC _{100 ans} /ha cumulé)	
			Approche ex post	Approche ex ante
30		6,9	1,7	0,9
40	35	8,6	5,1	2,9
50	44	7,2	7,8	4,8
60	37	16,2	15,3	9,3
70	82	15,6	20,2	13,0
80	79	8,1	20,4	15,5
90	41	10,3	23,3	18,5
100	52	4,6	22,1	19,7
110	24	5,6	21,8	21,0
120	28	22,5	29,9	27,0
130	114	2,9	26,5	26,7
140	14	17,4	31,2	28,9
150	88	2,5	34,9	27,4
160	12	11,5	35,8	26,2

Note : conversion du volume en tC : m³/ha x 0,393 (g/cm³ EPB anhydre) x 0,5 biomasse anhydre

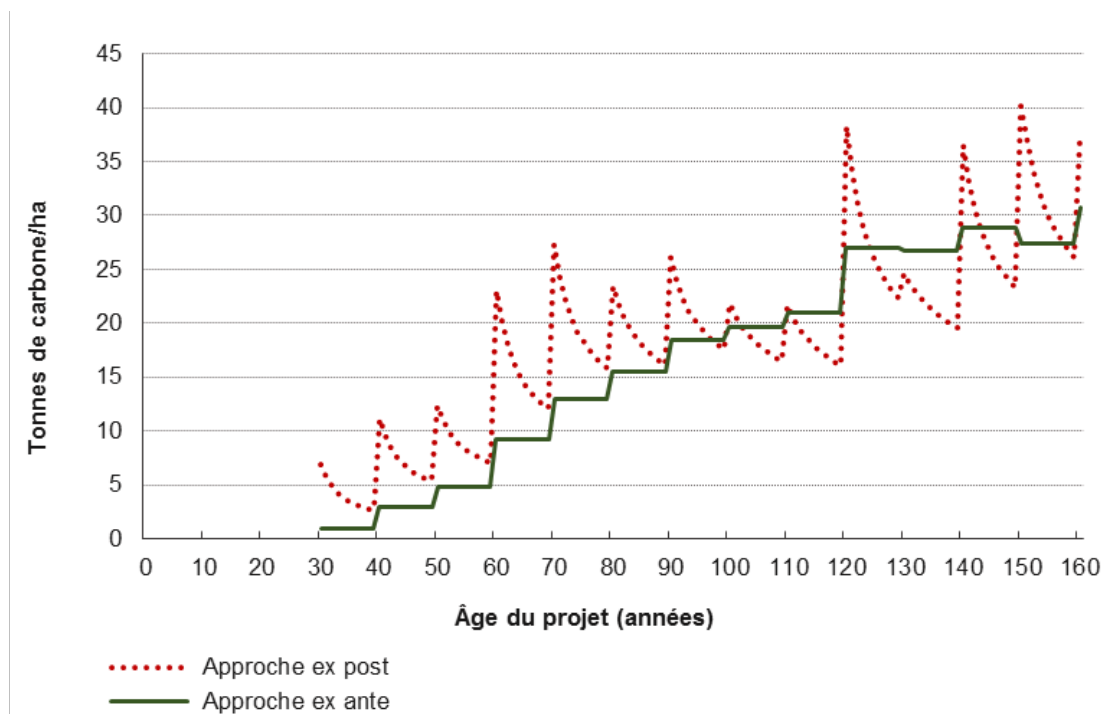


Figure 4 Carbone contenu dans les produits forestiers ligneux selon les approches ex post et ex ante

3.3 Estimation des crédits compensatoires

La quantité et la date de délivrance des crédits compensatoires varient selon le type d'approche utilisé pour réaliser un projet de boisement à des fins de séquestration de carbone. L'approche *ex ante* aura accumulé 275 t CO₂/ha, ce qui correspond à 275 crédits compensatoires à 60 ans. De ces 275 crédits compensatoires, une proportion de 21 % doit être soustraite du total pour être déposée dans le fonds de réserve contre les risques d'inversion du carbone séquestré. Il reste 218 crédits compensatoires qui seront mis en marché dès le début du projet. L'approche *ex post* génère 194 t CO₂/ha après 150 ans (figure 5). Dans le cas de l'approche *ex post*, la mise en marché des crédits compensatoires se fait lorsque le carbone est réellement séquestré.

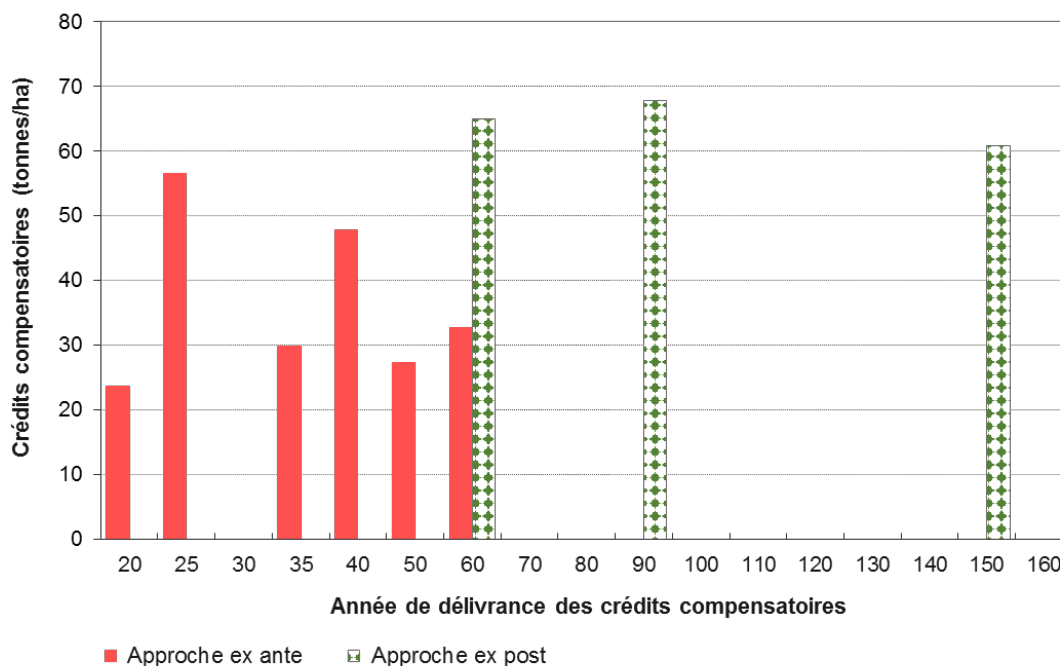


Figure 5 Quantité de crédits compensatoires mis en vente au cours de la durée d'un projet selon les approches ex post et ex ante

Pour chacune des deux approches, les dates de mise en marché de crédits compensatoires sont choisies de manière à maximiser la rentabilité du projet sans tenir compte de l'aide financière accordée. Les dates de délivrance pour l'approche *ex post* sont établies de manière à accumuler suffisamment de crédits compensatoires pour que les revenus couvrent les frais liés à leur mise en marché (inventaire, rapport de projet, vérification externe). Les dates de délivrance pour l'approche *ex ante* sont choisies dès l'atteinte de 30 t CO₂eq/ha, ce qui peut varier entre 3 ans en début de projet et 10 ans en fin de projet.

3.4 Revenus

Le revenu brut provient des récoltes forestières, de l'aide financière et de la vente des crédits compensatoires. Tandis que les revenus liés à l'aménagement forestier sont identiques pour les deux approches, ils varient pour ce qui est de la délivrance des crédits compensatoires. L'approche *ex ante* cumule un revenu de 6 500 \$ non actualisé après 60 ans tandis que l'approche *ex post* cumule un revenu de 4 230 \$ non actualisé après 150 ans.

3.5 Rentabilité du projet

Les flux monétaires actualisés, présentés pour les deux approches, sont regroupés par période de 10 ans. On y distingue les flux associés à l'aménagement forestier, à la gestion du carbone et à l'aide financière (figure 6).

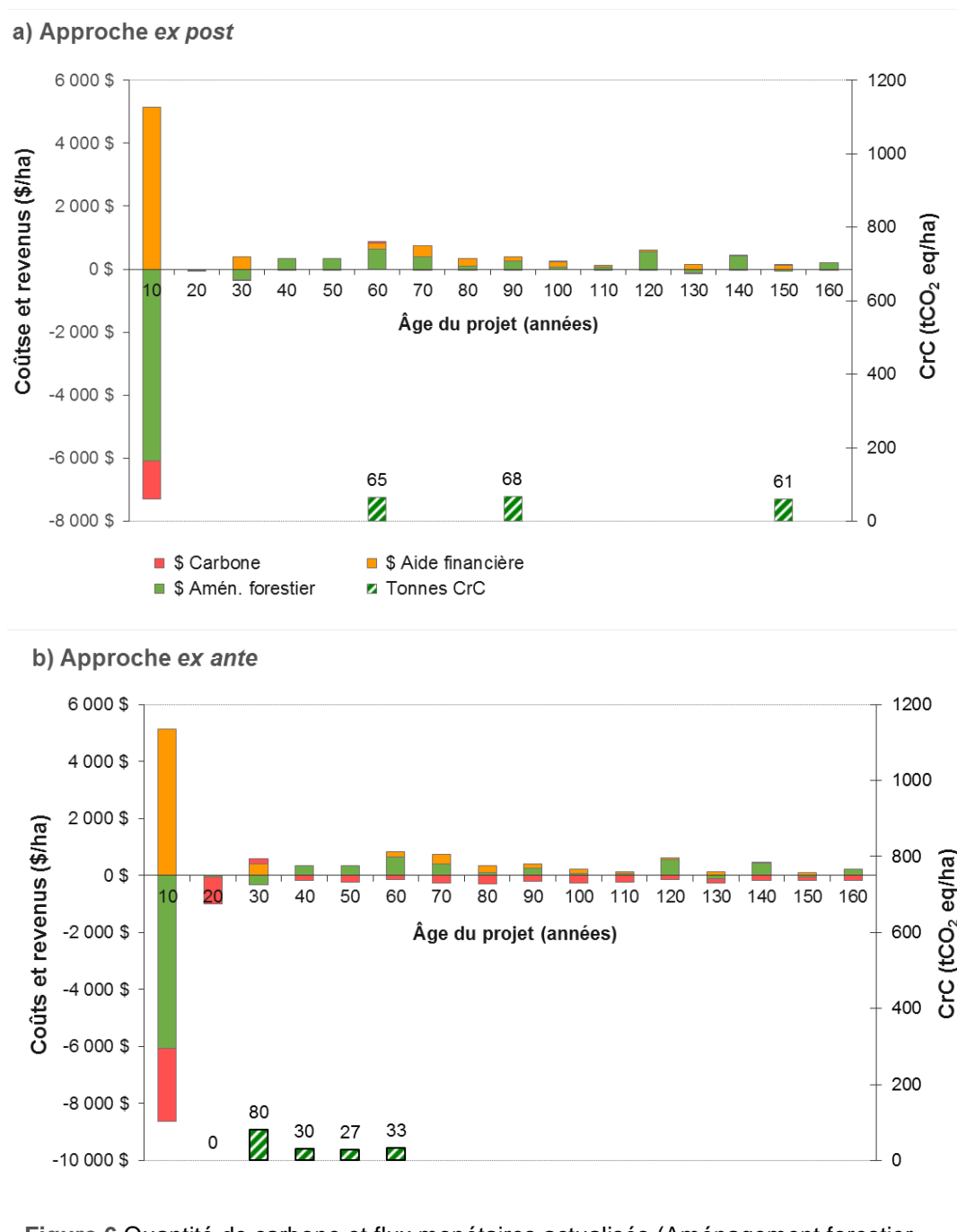
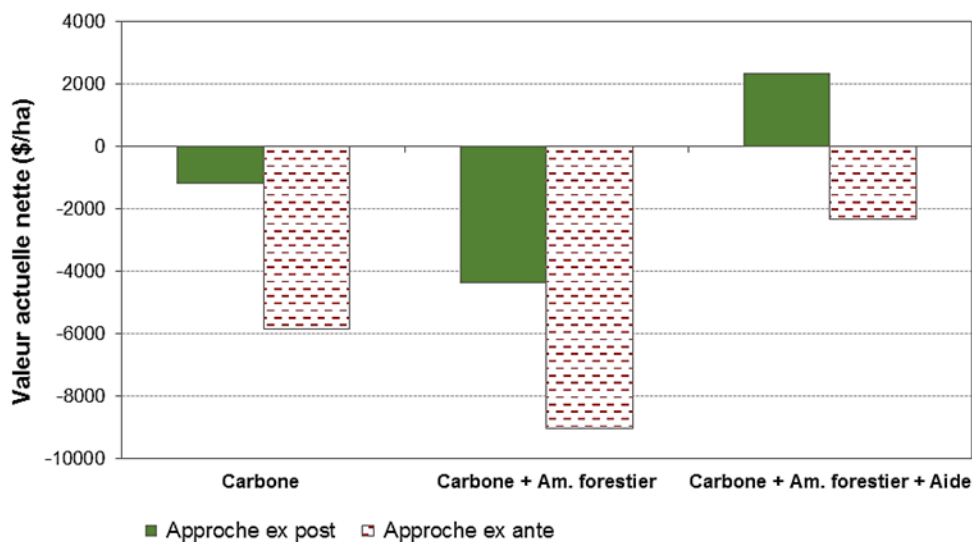


Figure 6 Quantité de carbone et flux monétaires actualisés (Aménagement forestier, Carbone et Aide financière), regroupés par période de 10 ans pour les approches : a) ex post et b) ex ante

Calculés pour un projet d'une superficie de 10 ha et un prix de 18 \$ CAN pour les crédits compensatoires, les coûts associés aux suivis, aux contrôles et aux vérifications externes périodiques, suivant l'approche *ex ante*, ne peuvent être compensés par la vente de crédits compensatoires. Le bilan, par période de 10 ans, démontre toutefois que pour la troisième période, soit entre 21 et 30 ans, les coûts associés à la gestion du carbone sont entièrement couverts permettant même un bénéfice net de 198 \$/ha.

L'approche *ex post* n'est déficitaire qu'en début de projet, un déficit qui ne peut être compensé par les ventes subséquentes des crédits compensatoires. En contrepartie, la vente de ces crédits couvre tous les coûts associés à leur mise en marché. Ces derniers représentent la majorité des coûts et sont dus aux suivis, rapports de projet et vérifications externes qui surviennent juste avant la délivrance des crédits compensatoires.

Au prix de 18 \$/tCO₂eq pour un projet de 10 ha, seule l'approche *ex post* s'avère rentable à condition d'obtenir de l'aide financière qui couvrira les coûts associés à la plantation et à l'éducation du peuplement forestier (figure 7). Cela dit, le volet Gestion du carbone ne peut ni s'autofinancer ni financer la partie Aménagement forestier. Il en est de même pour le volet Aménagement forestier qui, à lui seul, crée un déficit actualisé de 4 370 \$/ha. L'approche *ex ante* est fortement déficitaire sans aide financière; ses coûts ne pourront pas compenser les coûts associés à la gestion du carbone. En valeur actualisée, il en résulte un déficit net de 5 860 \$, tous volets compris, pour un projet d'une durée de 160 ans.



Note. La rentabilité est mesurée en fonction des flux monétaires associés à la gestion du carbone (carbone), à l'aménagement forestier (Am. forestier) et à l'aide financière (Aide).

Figure 7 Valeur actuelle nette de deux approches de calcul de crédits compensatoires basé sur le prix de 18 \$/tCO₂eq et d'une superficie de projet de 10 ha

L'indice de profitabilité compare la somme des revenus d'exploitation actualisés de chaque année à la somme des investissements initiaux. Plus l'indice est élevé, plus le projet est profitable. Lorsque l'approche *ex post* est appliquée au projet dans son ensemble, on constate qu'elle est profitable (figure 8). Cela confirme les résultats présentés plus haut. L'approche *ex post* a un indice élevé de 1,20 tandis que l'approche *ex ante* a un indice plus faible de 0,90. Ainsi, l'approche *ex post* offre un retour de 20 % sur la somme investie au départ.

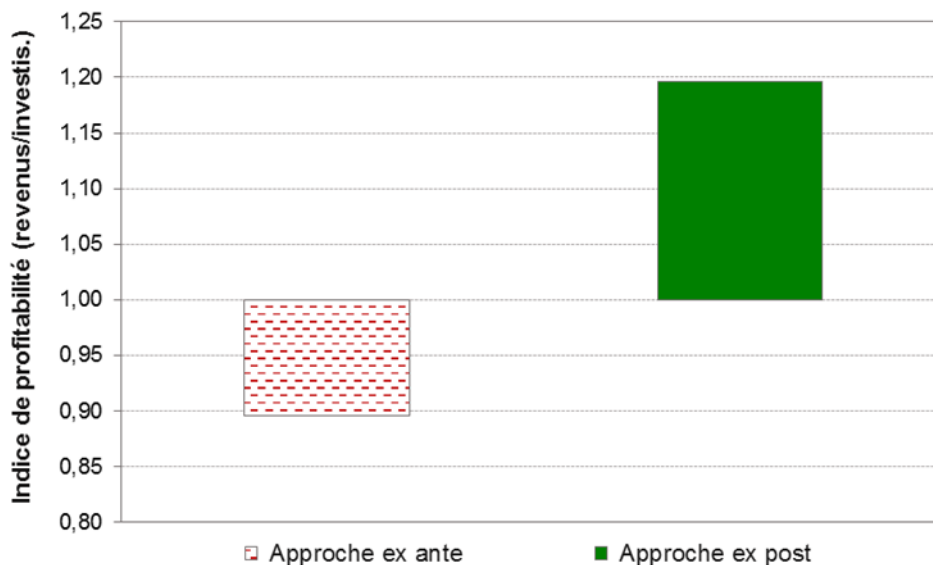


Figure 8 Indice de profitabilité du projet basé sur les flux associés aux volets Aménagement forestier, Aide financière et Gestion du carbone pour les approches *ex post* et *ex ante*

3.6 Test de sensibilité

Un test de sensibilité a été fait afin d'évaluer l'impact de la superficie du projet et du prix de la tonne de CO₂eq sur la rentabilité des deux méthodes de comptabilisation du carbone. Les volets Aide financière et Aménagement forestier en sont exclus. Ainsi, pour des projets de petites superficies allant jusqu'à 100 ha, l'approche *ex post*, atteint le seuil de rentabilité avant l'approche *ex ante* (figure 9). Pour une même superficie de 10 ha, l'approche *ex post* atteindra le seuil de rentabilité à un prix du carbone de 50 \$/tCO₂eq, ce qui se situe à l'intérieur des marges estimées par l'industrie en Amérique du Nord (CDP, 2014; Gouvernement du Canada, 2016; Sustainable Prosperity, 2013) tandis que, pour une même superficie, la méthode *ex ante* sera rentable à partir de 90 \$/tCO₂eq. Partant d'un prix de 18 \$/tCO₂eq, le volet Gestion du carbone sera rentable à partir d'une superficie de 36 ha de boisement pour l'approche *ex post* alors que l'approche *ex ante* nécessitera une superficie de 60 ha avant d'atteindre le seuil de rentabilité. Avec une augmentation de la superficie du projet, l'écart observé entre les seuils de rentabilité diminue de manière asymptotique sans que les deux courbes se croisent. L'effet dégressif du test de sensibilité indique que l'augmentation de la superficie pour les plus petits projets a une plus forte influence sur le seuil de rentabilité pour l'approche *ex ante* que pour l'approche *ex post*. Par exemple, en doublant la superficie du projet de 10 à 20 ha, le seuil, mesuré en fonction du prix du carbone, diminue de 50 à 23 \$/tCO₂eq pour l'approche *ex post* tandis qu'il diminue de 90 à 45 \$/tCO₂eq pour l'approche *ex ante*. On note toutefois que l'approche *ex post* est toujours plus

rentable. Dans le cas de l'approche *ex ante*, le constat sur la rentabilité et profitabilité est négatif lorsqu'on compare des projets de superficie égale.

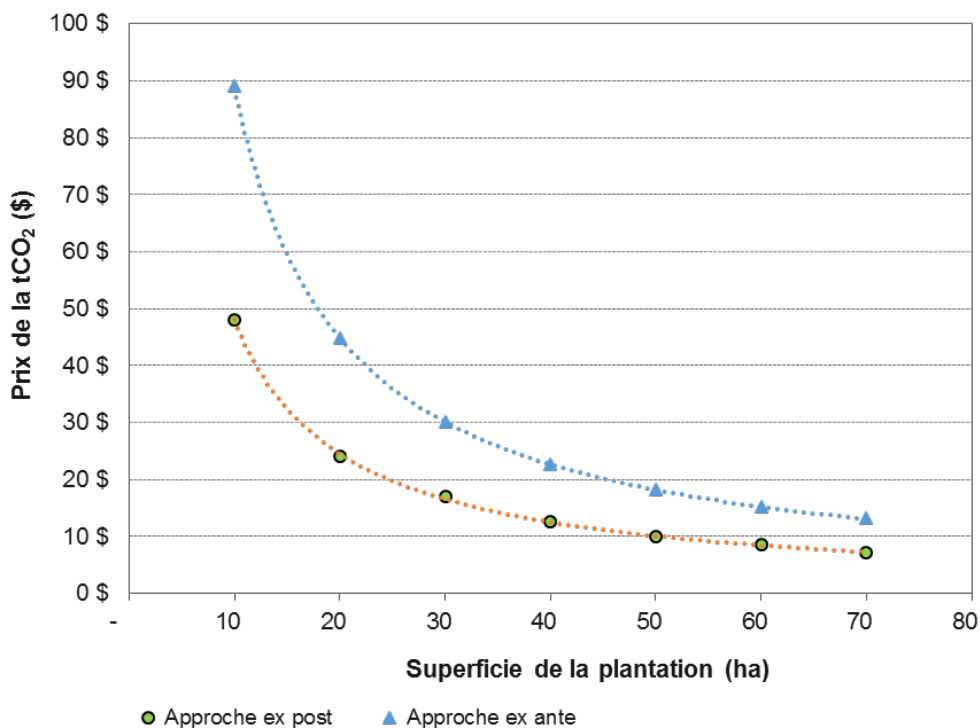
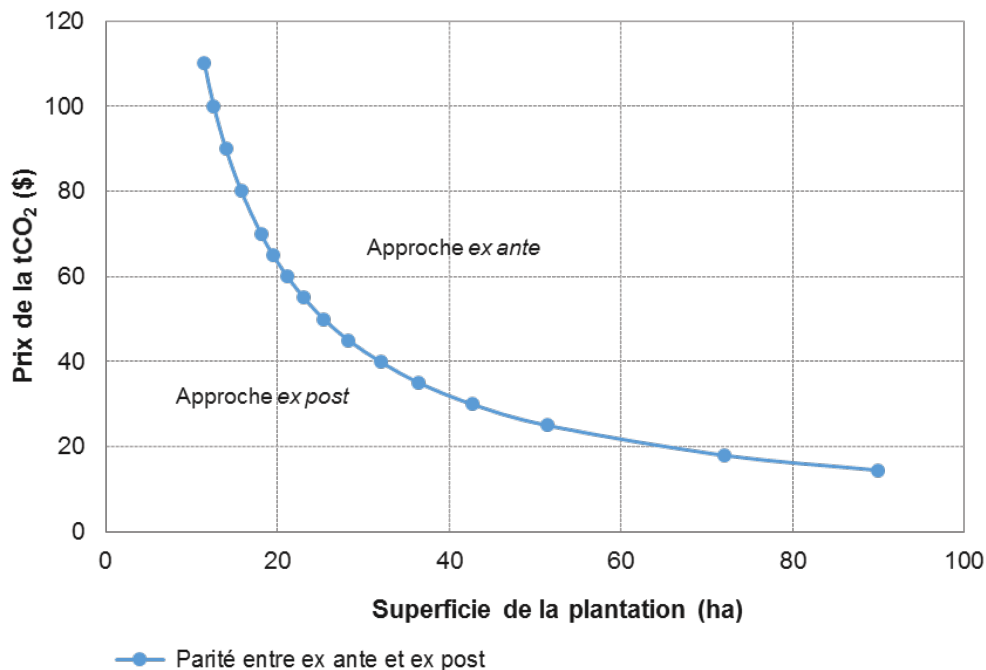


Figure 9 Seuils de rentabilité pour les approches ex post et ex ante en fonction de la superficie et du prix de la tonne de CO₂eq (\$ CAN)

La figure 10 indique à partir de quelle superficie et de quel prix pour la tonne de carbone une approche est supérieure à l'autre. D'un point de vue financier, l'approche *ex post* est supérieure pour les valeurs en dessous de la courbe tandis que l'approche *ex ante* est plus avantageuse pour les valeurs au-dessus. À prix égal pour la tonne de CO₂eq, l'approche *ex post* est financièrement préférable lorsque les projets sont réalisés sur de petites superficies. Cela corrobore les résultats du test de sensibilité.



Note : Les valeurs sous la courbe indiquent une meilleure rentabilité pour l'approche *ex post* et les valeurs au-dessus de la courbe indiquent une meilleure rentabilité pour l'approche *ex ante*.

Figure 10 Équivalence financière entre les approches *ex post* et *ex ante*

4. Discussion

4.1 Aspect du carbone lié aux méthodes de comptabilisation

L'analyse financière comparative de comptabilisation du carbone des approches *ex post* et *ex ante* est basée sur l'utilisation de deux types de protocoles de séquestration du carbone en milieu forestier. Dans les deux cas, la méthode de quantification du carbone est semblable pour les inventaires de biomasse et les règles d'exclusion de certains réservoirs tels que le sol et la litière. Les hypothèses quant aux scénarios sylvicoles, à l'association des bois récoltés, aux différents produits forestiers ligneux en fonction des diamètres récoltés et du prix du bois ont été choisies selon les meilleures connaissances disponibles. Les mêmes hypothèses ont été retenues pour les deux approches ce qui minimise les risques de biais lors de l'analyse comparative.

Toutefois, des différences apparaissent entre les deux approches lorsqu'il s'agit d'estimer le carbone dans les produits forestiers ligneux. Dans l'approche *ex post*, le carbone doit être estimé annuellement, on obtient donc des fluctuations du taux de carbone principalement attribuables à la durée de vie restreinte du papier et du bois de chauffage. Il en résulte des quantités de carbone qui, l'année de la récolte, sont nettement plus élevées que les valeurs moyennes appliquées dans l'approche *ex ante*. Cet effet s'atténue cependant entre deux périodes de récolte.

La somme totale de crédits compensatoires générés au cours de la durée de vie du projet et leur disponibilité sur le marché du carbone révèle a priori l'aspect avantageux de l'approche *ex ante*. On note un gain net de 11 % en faveur de cette approche et une disponibilité des crédits sur le

marché relativement hâtive dans la vie du projet, soit au cours des 60 premières années. Cette disponibilité hâtive n'est cependant possible qu'en anticipant un effet de compensation réel d'une émission. Celui-ci se traduit par une séquestration de carbone pour une durée de 100 ans à laquelle s'ajoute une cotisation de 21 % au fonds de réserve contre les risques d'inversion du carbone séquestré. Un suivi périodique du bilan de carbone tout au long de la vie du projet démontre l'effet réel de séquestration du carbone. Toutes ces conditions permettent finalement d'atteindre l'objectif, selon la méthode *ex ante*, qui est de compenser dans un laps de 100 ans une émission ayant eu lieu à l'année zéro. Elles réduisent cependant la gestion forestière à une gestion de carbone.

Vue sous l'angle de l'intégrité environnementale, l'approche *ex ante* ne tient pas compte du facteur temps. L'usage de la variable massique ne permet pas de quantifier un effet réel sur le système climatique. Pour cela, le potentiel compensatoire de l'approche *ex ante* résulte de la séquestration d'une tCO₂ qui ne peut être qu'anticipée ou conditionnelle à une garantie de séquestration temporaire. À l'inverse, l'approche *ex post* implique l'accumulation d'un effet refroidissant réel qui sera réparti sur 100 ans avant qu'un crédit compensatoire puisse être émis. Cela veut donc dire qu'au moment de la délivrance d'un crédit compensatoire, celui-ci compense immédiatement l'effet réchauffant d'une émission de GES dans le système climatique.

Au cours du projet, toute récolte diminue l'effet d'évitement sur le réchauffement climatique. Une partie de cette récolte, qui sera transférée dans les produits du bois, atténuera temporairement la diminution de l'effet d'évitement selon la longévité de la gamme des produits. La flexibilité de cette approche n'est pas reflétée dans cette étude, ce qui explique que le rendement en crédits compensatoires est sous-exploité. En effet, d'autres scénarios d'aménagement plus efficaces auraient été envisageables : réduire le risque de production en limitant la durée du projet ou encore augmenter la productivité par le choix des essences et de la durée des révolutions, sans compromettre l'intégrité environnementale.

4.2 Aspects financiers

La rentabilité financière comparative est présentée sous trois volets regroupés. Chaque regroupement se distingue par des flux monétaires liés : 1) à la gestion du carbone; 2) à l'aménagement forestier et à la gestion du carbone; 3) à l'aménagement forestier, à la gestion du carbone et à l'aide financière accordée aux propriétaires. En ne tenant compte que des flux monétaires liés à la gestion du carbone, on estime si le projet carbone est en mesure de s'autofinancer. Cette situation survient lorsque le propriétaire des terres se réserve la gestion forestière, laissant la gestion du carbone à une tierce personne. Le second volet, qui tient compte des flux associés à l'aménagement forestier et à la gestion du carbone, suppose que le propriétaire et le promoteur sont une seule et même personne. Ainsi, l'aménagement forestier et la gestion du carbone deviennent indissociables. L'exclusion de l'aide financière accordée aux propriétaires se justifie par la nature même de l'aide qui consiste a priori à soutenir la filière bois plutôt que la filière carbone. Étant donné que l'approche *ex post* permet une gestion forestière indépendante de celle du carbone, donc sans limites, l'aide financière ne serait pas compromise. Par contre, cet argument est difficilement justifiable pour l'approche *ex ante* qui exige de faire prévaloir la gestion du carbone afin de respecter le critère de permanence. Le troisième volet, qui inclut l'aide financière accordée aux propriétaires, repose sur l'hypothèse que l'aide est compatible avec le critère d'additionnalité dans la gestion du carbone et s'avère compatible avec les programmes de mise en valeur de la forêt privée.

Les indices financiers employés permettent de comparer la rentabilité des deux approches sous la forme d'une valeur actualisée nette et de la profitabilité. La valeur actualisée nette s'avère moins ambiguë et mieux adaptée aux projets à très long terme comparé au taux de rendement

interne (Gollier, 2005). Elle nécessite cependant de définir un taux d'actualisation qui reflète le taux de rendement attendu, tout en tenant compte des risques spécifiques au projet. Le taux de 4 % dégressif après 30 ans répond avantageusement à ces attentes. De cette manière, il tient compte du risque associé au projet et de la préférence des consommateurs pour le présent, tout en soulignant le bénéfice que peut apporter un tel projet pour les générations futures (Conférence européenne des ministres des transports, 2005; Lainesse et Auclair, 2013).

Réaliser un tel projet pour investir dans l'avenir nécessite des connaissances sur les revenus. Étant donné la durée du projet et la date à laquelle les crédits compensatoires seront vendus, l'évolution du prix du carbone constitue l'élément clé de la décision. La projection du prix du carbone telle qu'elle est appliquée dans le test de sensibilité se base sur la volonté des entreprises d'attribuer une valeur à la tonne de CO₂eq qui, depuis peu, entre dans leurs états financiers (Gouvernement de la Grande-Bretagne, 2011; Valatin, 2011). De plus, les hypothèses actuelles laissent supposer une augmentation du prix de la tonne de CO₂eq en raison d'une volonté accrue de réduire les émissions de GES (Quinet et autres, 2008; Fjellheim et Schjølset, 2016). Toutefois, dans l'état actuel du marché, le prix du CO₂eq à la tonne est faible, ce qui n'est pas propice à la mise en place de tels projets.

Au prix de 18 \$/tCO₂eq, l'approche *ex post* est rentable si les propriétaires reçoivent l'aide financière prévue, car selon le scénario sylvicole appliqué, le volet Aménagement forestier à lui seul reste déficitaire. L'ampleur du déficit sera influencée par le moment où les investissements surviennent dans la vie du projet, leur récurrence et le montant qu'ils représentent. Les investissements liés à la gestion du carbone regroupent les coûts de planification, de vérification et de mesurage. Étant donné que les investissements se font au début du projet, le taux d'actualisation de 4 % augmente leur importance sur la valeur actualisée nette. Les premiers revenus provenant de la vente de crédits compensatoires ne surviennent que lorsque la plantation atteint l'âge de 20 ans pour l'approche *ex ante* et de 60 ans pour l'approche *ex post* et ne peuvent compenser les investissements associés à la gestion du carbone en raison de l'effet d'actualisation.

4.3 Différences entre les deux approches

En analysant le déficit attribuable à la gestion du carbone, l'approche *ex ante* se distingue de l'approche *ex post* à trois moments clés du projet. Avant la vente de crédits compensatoires, les investissements servent tout d'abord à faire l'état des lieux, en estimant le niveau initial de carbone dans les différents réservoirs, puis à faire des projections pour le scénario de référence. Par la suite, et au cours de toute la vie du projet, soit 160 ans dans cette étude, l'évolution du carbone doit être mesurée et confirmée périodiquement par un vérificateur externe sans qu'il y ait de revenus. Enfin, à chaque période de délivrance, quand le bilan carbone est établi, le fonds de réserve de 21 % doit être approvisionné avant la mise en vente des crédits compensatoires pour parer aux risques d'inversion du carbone séquestré.

Sous un régime *ex post*, les suivis et les mesures entre les dates de délivrance sont souhaitables, mais pas obligatoires, ce qui permet au promoteur de réduire ses coûts fixes. Cela résulte du fait que cette approche calcule l'effet du réchauffement évité éliminant ainsi toute condition rattachée à la délivrance.

Les approches se distinguent également quant aux obligations qui s'appliquent après la vente des crédits compensatoires. L'approche *ex post* libère le promoteur de toute obligation associée à la gestion du critère de permanence (engagement, limite à l'aménagement forestier, maintien physique du carbone, gestion du risque de retour à l'atmosphère du carbone, etc.) et lui permet de mettre fin au projet à n'importe quel moment. Par contre, l'approche *ex ante* exige la mise en

place de mécanismes de contrôle pour respecter le critère de permanence. Cette contrainte supplémentaire consiste à maintenir une quantité de carbone dans les réservoirs au moins égale à celle du scénario de référence. Cette contrainte a un impact sur le choix du scénario sylvicole et se répercute sur certains coûts d'opportunités rattachés à la production forestière qui ne sont pas pris en compte dans cette étude. Au-delà de la liberté de gestion forestière s'ajoute la liberté de gestion du territoire. Le fait de restreindre le libre choix de la gestion, tel que le prévoit le critère de permanence, réduit les occasions d'affaires, ce qui est susceptible d'entraîner des pertes de gains qui ne sont pas pris en compte dans cette étude. Compte tenu du récent intérêt du monde agricole pour les friches, qu'il utilise de manière ponctuelle pour faire des plantations d'essences à croissance rapide, il s'agit d'un élément particulièrement important (Delagrangé, 2011). Cela permettrait de générer de la biomasse ainsi que des crédits compensatoires tout en maintenant la vocation agricole du territoire. Cependant, cette flexibilité dans la manière d'aménager une superficie est difficilement compatible avec le critère de permanence exigé dans l'approche *ex ante*.

L'impact de l'approche retenue sur la valeur d'un terrain forestier n'a pas non plus été pris en considération dans cette étude. Cependant, cette valeur est influencée par les servitudes ou les droits qui y sont inscrits. Un projet de séquestration qui se conforme à l'approche *ex ante* inclut le critère de permanence, ce qui fait en sorte que l'acquisition de la plantation ne peut se faire sans le projet de séquestration du carbone, à moins de rembourser les crédits compensatoires délivrés. Si l'acquisition de la plantation inclut le projet de séquestration du carbone, cela implique que l'acheteur adhère au programme et finance le suivi et la vérification externe sans qu'il y ait nécessairement une délivrance de crédits compensatoires. En raison des obligations de l'approche *ex ante*, la valeur du terrain sera potentiellement réduite en conséquence. Le même scénario avec l'approche *ex post* ne comporte aucune condition imposée à l'acheteur, ce qui lui donne la possibilité de vendre éventuellement des crédits compensatoires sans avoir l'obligation d'adhérer au projet de séquestration du carbone. Le terrain ne perdra pas de valeur et pourrait même, le cas échéant, être négocié à la hausse en raison de l'option de vente de crédits compensatoires.

Sous les conditions de rendement forestier et de structure de propriétés observées au Québec, l'approche *ex post* se distingue par une gestion forestière indépendante de la gestion du carbone et par des coûts fixes peu élevés. Pour des projets de faible superficie, l'impact des coûts fixes est encore plus important, surtout si le prix du carbone est peu élevé (Kerchner et Keeton, 2015).

Le test de sensibilité réalisé se limite au scénario sylvicole utilisé pour l'analyse comparative. Les dates de vente des crédits compensatoires, optimisées exclusivement dans le scénario initial (10 ha et 18 \$/tCO₂eq), n'ont pas été réajustées en fonction des effets de la superficie ou du prix du carbone. Ainsi, l'étude se limite à mesurer l'effet de la superficie et du prix du carbone sans aucune mesure d'optimisation. Une optimisation des scénarios sylvicoles en fonction du prix du carbone ainsi qu'une rectification de la date de vente des crédits compensatoires devrait améliorer le seuil de rentabilité, et cela, d'autant plus que l'approche *ex post* offre une flexibilité dans la gestion forestière et dans celle du carbone (Rodrigues, 2011). Cette approche, qui permet au promoteur de détacher la gestion forestière de la gestion du carbone, pourrait dans un tel contexte utiliser un scénario sylvicole adapté à la situation sur le terrain, ce qui se répercuterait positivement sur la rentabilité du projet. L'interdépendance entre la partie carbone et la partie sylvicole qu'on observe dans l'approche *ex ante* nécessite que le produit dominant, ici le carbone, soit rentable pour compenser le déficit lié à la gestion forestière.

Murray et autres (2012) soulèvent les aspects du risque de la non-permanence en comparant différentes approches de comptabilisation du carbone. Les enjeux liés à la gestion du risque tel qu'ils apparaissent avec l'approche *ex ante* ne peuvent assurer l'intégrité environnementale sans

que le mécanisme de garantie contre les risques s'alourdisse. Cela se répercute sur les coûts fixes et sur un déboursement accru pour le fonds de réserve contre les risques d'inversion. En contrepartie, l'approche *ex post* se distingue par une valeur nette actualisée faible en raison de la quantité de crédits compensatoires pouvant être délivrée dans le temps. D'autres études se penchent sur une comparaison entre différents protocoles appliquant tous la méthode *ex ante* comme base de calcul. Les constats confirment les résultats trouvés ici. Roussell-Roy et autres (2014) et Yonavjak Swedeen et Talberth (2011) soulignent l'effet inhibiteur des coûts de transaction actuellement trop élevés en raison d'un retour sur l'investissement trop long. Galik et autres (2009) constatent une corrélation négative entre les coûts de transaction et la superficie de projet, le type de couvert et l'âge de rotation. La corrélation s'avère positive, se traduisant par des coûts de transaction croissants pour le choix du type d'approche ainsi que pour les régions écologiques les plus pauvres. Il est généralement admis que l'intérêt économique du promoteur n'est pas encore au rendez-vous pour les petits projets à faible rendement en raison des coûts fixes élevés (Rodrigues, 2011).

4.4 Avantages de l'approche *ex post*

Un des principaux rôles des administrateurs de programmes de crédits compensatoires consiste à s'assurer que les crédits délivrés annulent les effets négatifs des émissions de GES compensés par leur usage (concept d'intégrité environnementale). En ce sens, peu importe la durée de vie du mécanisme de marché mis en place, l'approche *ex post* répond à cette obligation et limite les effets négatifs futurs sur le système climatique associé au fait qu'une émission passée de GES n'a pas été entièrement compensée et que le carbone séquestré qui retourne à l'atmosphère ajoute un poids supplémentaire au bilan énergétique planétaire.

Le seuil de rentabilité est atteint plus rapidement avec l'approche *ex post* sur de petites superficies. De façon générale, les superficies susceptibles de faire l'objet d'un projet de boisement et de reboisement sont de plus petite taille au Québec.

Puisque l'approche *ex post* n'exige ni contrôle récurrent ni suivi, elle laisse entrevoir une plus grande rentabilité, et ce, malgré un nombre de crédits compensatoires délivrés plus faible.

Après la vente de crédits compensatoires, il n'y a plus aucune exigence de maintien du carbone dans la biomasse.

L'approche *ex post* donne plus de latitude au promoteur, puisque la gestion forestière est indépendante de la gestion du carbone.

La valeur du terrain pourrait être augmentée grâce à l'option de vente de crédits compensatoires.

L'usage et l'accessibilité d'un territoire ne sont pas limités par l'approche *ex post*.

4.5 Inconvénients de l'approche *ex post*

Étant donné que l'approche *ex post*, caractérisée par le principe de tonnes métriques par année, rémunère l'effet passé d'une séquestration de carbone, l'accumulation de crédits compensatoires prend plus de temps, ce qui a pour conséquence que les revenus associés à leur délivrance surviennent plus tard dans la vie du projet. En actualisant ces revenus, leur effet dans l'équilibre budgétaire est moins élevé.

Conclusion

Peu importe l'approche utilisée pour délivrer un crédit compensatoire, l'étude démontre que les projets de séquestration qui consistent à boiser des friches nécessitent un investissement initial élevé de la part du promoteur, autant pour la partie sylvicole que pour la partie carbone. L'obligation de maintenir chaque quantité de carbone récompensé par un crédit compensatoire hors de l'atmosphère représente le principal défi à la mise en place de projets de ce type. Un projet qui prévoit le boisement d'une superficie nécessite que le promoteur et les administrateurs du programme aient confiance dans la survie de la plantation et du mécanisme de marché. Considérant que peu de projets de séquestration avec boisement et reboisement utilisant l'approche *ex ante* ont été mis en place, cela semble indiquer que l'investissement est encore trop risqué (Boyd et autres, 2007; Thomas et autres, 2010). Avec l'approche *ex post*, pour que les projets de boisement et de reboisement soient suffisamment attrayants, il faudra que les coûts initiaux liés à l'inventaire, à la validation par une tierce personne et au plan de projet diminuent. Aussi, afin de respecter les différents critères qui caractérisent un crédit compensatoire et les exigences d'un programme de crédits compensatoires, il serait illusoire de croire que la vente de ces crédits peut se faire longtemps avant la récolte du bois sans qu'il y ait de conséquences financières ou opérationnelles. La vente de ces crédits ne représente donc qu'un revenu d'appoint qui s'ajoute au revenu principal provenant de la récolte du bois. Lorsqu'ils sont conscients des aspects financiers et de la durée d'un projet conçu sur le modèle *ex post*, il devient plus facile pour les acteurs du marché du carbone de décider de contribuer à la lutte contre les changements climatiques.

ANNEXE – Hypothèses retenues pour l’analyse comparative entre l’approche ex post et l’approche ex ante

1. Méthode

Les données utilisées dans cette étude correspondent à la situation écoforestière, climatique, économique et fiscale observée dans la région du Bas-Saint-Laurent. Cette région se distingue par un nombre élevé d’anciennes friches agricoles pouvant être boisées. L’étude de cas se fonde sur deux éléments qui sont, d’une part, les flux de carbone comportant la séquestration du carbone, les réservoirs et des méthodes de quantification et, d’autre part, les flux monétaires liés à un projet de boisement dans un contexte d’atténuation de l’effet des changements climatiques.

2. Séquestration du carbone

La mise en place d’un projet de crédits compensatoires implique de définir un scénario de référence (ScR) et un scénario de projet (ScP). Le bilan entre les deux scénarios permet de démontrer s’il y a un gain ou une perte en carbone additionnel.

SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE

Le scénario de référence présente l’état initial du territoire c’est-à-dire, dans le cas qui nous concerne, l’état de la friche agricole avant le début du projet de boisement, et les hypothèses qui permettent de définir son évolution naturelle en l’absence de reboisement.

Aux fins de l’analyse comparative, le scénario de référence correspond à une friche herbacée de 10 ha, comprenant quelques feuillus intolérants et quelques arbustes. Afin d’estimer l’accumulation de carbone dans le temps, une courbe de rendement, élaborée pour le protocole de crédits compensatoires dans les projets de séquestration de carbone en territoire privé québécois, lui est attribuée. Elle est spécifique à la région écologique 4f pour le groupe de végétation potentielle MS (figure 11). Le type de couvert est constitué de feuillus intolérants et la densité est estimée à partir de l’inventaire initial de la friche. Les quantités de carbone des réservoirs dans la friche au temps zéro sont présentées dans le tableau 7.

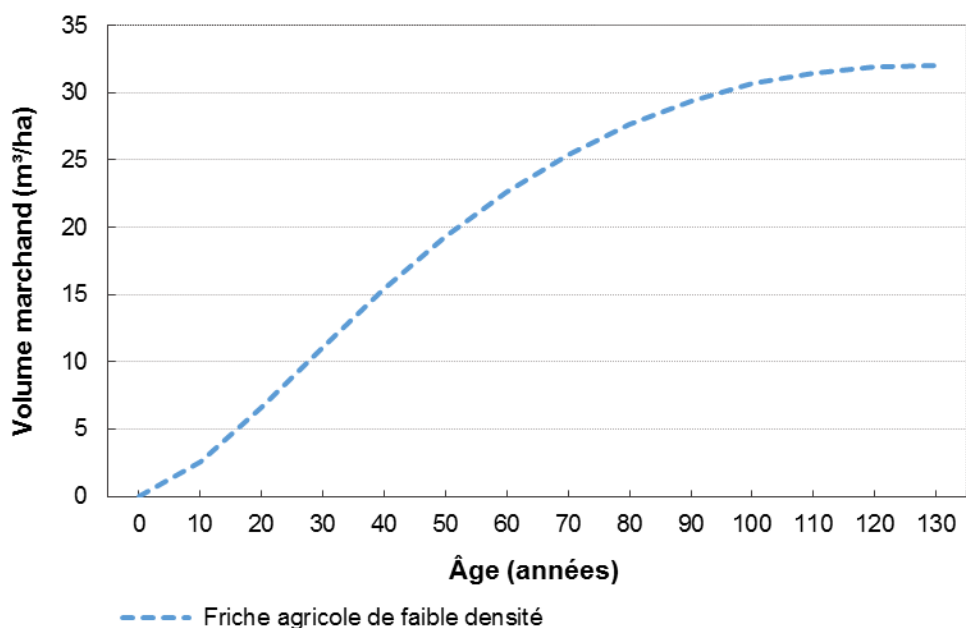


Figure 11 Courbe de rendement pour une friche feuillue de faible densité dans la végétation potentielle MS_ de la région écologique 4f

Tableau 7 Quantité de carbone associé aux différents réservoirs pour une friche herbacée ayant une régénération en feuillus de faible densité

Réservoir	Quantité (tC/ha) au temps zéro
Arbustes	0,1
Feuillage (herbacés)	3,0
Radicelles	6,2
Racines	0,3
Chicot, branches	0,0

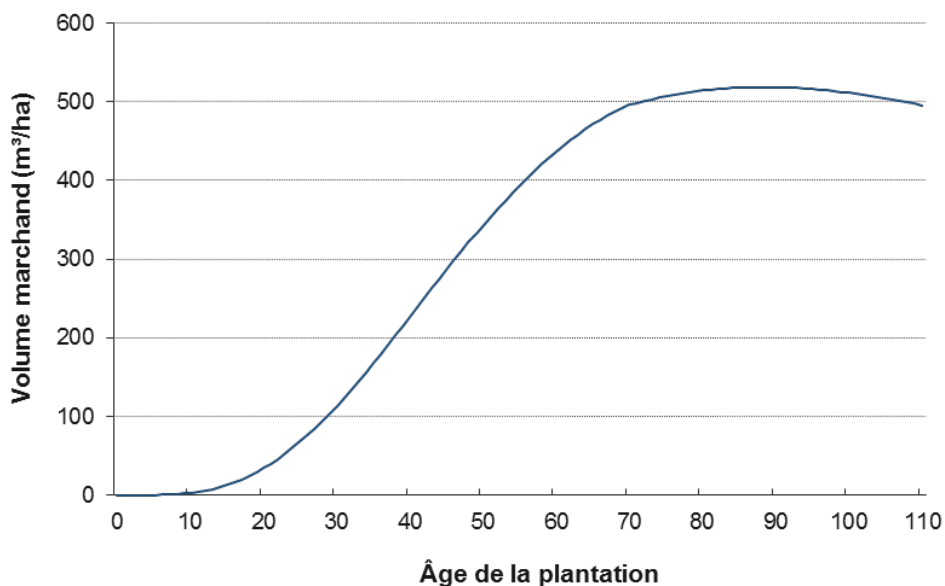
SCÉNARIO DE PROJET

Le scénario de projet présente l'évolution des conditions du territoire, en l'occurrence la friche reboisée, à la suite de la mise en place du projet de séquestration de carbone.

Aux fins de l'analyse comparative, le même scénario de projet est utilisé pour les approches *ex post* et *ex ante*. Le choix des interventions sylvicoles répond d'une part aux exigences de l'approche *ex ante* qui sont plus restrictives quant aux possibilités d'aménagement forestier (intensité et fréquence des interventions) et, d'autre part, à une rentabilité maximale pour les crédits compensatoires et la vente de bois. Le critère de permanence, tel qu'il a été défini par les partenaires de la WCI, exige que le projet soit maintenu 100 ans après la vente du dernier crédit compensatoire qui, pour l'approche *ex ante*, a lieu à 59 ans. Durant toute la vie du projet, soit 159 ans, la biomasse vivante hors terre mesurée doit être supérieure à celle du scénario de

référence. Il en résulte une subdivision du projet en six blocs dont la taille varie entre 5 et 30 % de la superficie totale du projet. Le scénario prévoit un désherbage suivi d'un scarifiage sur moins de 25 % de la superficie du projet avant la mise en terre des plants. En respectant le seuil maximum de 25 %, il n'est pas nécessaire d'estimer le flux de carbone dans le sol, ce qui réduit les coûts d'inventaire.

Le scénario sylvicole retenu pour les deux approches prévoit une densité de plantation de 2 000 plants/ha et des traitements sylvicoles conçus pour produire des grumes à faible nodosité avec une plus-value. L'indice de qualité de station (IQS) pour l'épinette blanche est de 10 m à 25 ans (IQS₂₅ 10). La table de rendement utilisée est celle de Prégent et autres (2010) pour l'épinette blanche, extrapolée jusqu'à 110 ans (figure 12). L'intensité des éclaircies dans chacun des blocs varie entre 25 et 35 % de la surface terrière avant la coupe. Les travaux d'éclaircie sont planifiés lorsque l'âge de la plantation se situe entre 30 et 50 ans (tableau 8). Les récoltes finales dans les blocs 1 à 6 se font tous les 10 ans dès l'âge de 60 ans. Des plantations sont prévues dans les trois premiers blocs. Dans le but de respecter les exigences de permanence, 90 % de la récolte se fera avant 100 ans, et les derniers individus de la première génération d'arbres devront être préservés jusqu'à 110 ans.



Source : adapté de G. Prégent, G. Picher et I. Auger, 2010

Figure 12 Courbe de rendement du volume marchand d'une plantation d'épinette blanche ayant une densité de 2 000 plants/ha et un IQS de 10 m à 25 ans

Tableau 8 Scénarios sylvicoles appliqués dans chacun des blocs de récolte pour les approches ex post et ex ante

Bloc du projet	% de la superficie	Âge du projet	Type d'intervention
1	30	1	Boisement ^a
		30	Éclaircie commerciale 35 % (EC35 %)
		40	Éclaircie commerciale 30 % (EC30 %)
		60	Coupe totale à 97 % (CT)
		61	Plantation (PLANT)
		90	EC35 %
		100	EC30 %
		120	CT
		121	Succession naturelle (SUCC NAT)
		130	Éclaircie précommerciale 85 % (EPC)
		150	EC35 %
160	EC30 %		
2	30	1	Boisement
		30	EC35 %
		40	EC30 %
		50	EC25 %
		70	CT
		71	PLANT
		100	EC35 %
		110	EC30 %
		120	EC25 %
		140	CT
		141	SUCC NAT
150	EPC		
3	15	1	Boisement
		30	EC35 %
		40	EC30 %
		50	EC25 %
		80	CT
		81	PLANT
		110	EC35 %
		120	EC30 %
		130	EC25 %
		160	CT
4	15	1	Boisement
		30	EC35 %
		40	EC30 %
		50	EC25 %
		90	CT
		91	SUCC NAT
		100	EPC
		120	EC35 %
		130	EC30 %
		140	EC25 %
5	5	1	Boisement
		30	EC35 %
		40	EC30 %
		50	EC25 %
		100	CT
		101	SUCC NAT
		110	EPC
		130	EC35 %
140	EC30 %		
150	EC25 %		
6	5	1	Boisement
		30	EC35 %
		40	EC30 %
		50	EC25 %
		110	CT
		111	SUCC NAT
		120	EPC
		150	EC35 %
160	EC30 %		

a. Boisement : Création d'un peuplement forestier sur un terrain qui n'est pas boisé.

3. Réservoirs de carbone

Le choix des réservoirs de carbone pris en compte dans cette étude est identique pour les approches *ex post* et *ex ante*. La biomasse morte et vivante (épigée et sous terre) ainsi que les produits forestiers ligneux (PFL) font partie des réservoirs. En contrepartie en sont exclus la litière et le carbone contenu dans le sol. L'évolution des quantités de carbone dans les différents réservoirs est obtenue à l'aide du modèle de bilan du carbone MBC-SCF3 (Kurz et autres, 2009). À partir de volumes de bois sur le terrain, ce modèle estime les flux de carbone entre les différents réservoirs en tenant compte de variables prédéfinies telles que la grande région écoforestière, le type de sol et les essences forestières. Les paramètres par défaut proposés par le modèle ont été utilisés pour le calcul des flux de carbone entre les réservoirs. À cela s'ajoutent les données spécifiques au projet, comme les courbes de rendement (figures 11 et 12) et la quantité de carbone dans les réservoirs au début du projet.

Le carbone provenant du réservoir des produits forestiers ligneux est également calculé à partir du modèle MBC-SCF3 qui tient compte des scénarios sylvicoles mentionnés plus haut. Les proportions attribuées aux différents types de produits forestiers ligneux sont estimées à l'aide du modèle USINE (FPInnovation, 2009). Ces proportions varient en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) moyen de la tige, de sa longueur et de son défilement. Le tableau 9 présente la proportion des différents produits forestiers ligneux en fonction de l'âge de l'éclaircie commerciale ou de la coupe finale de la plantation et du diamètre moyen récolté.

Tableau 9 Proportion (en %) des produits forestiers ligneux en fonction de l'âge de l'éclaircie ou de la coupe finale de la plantation (modèle USINE) et du diamètre à hauteur de poitrine

Catégorie de produits	Âge de récolte								
	30	40	50	60	70	80	90	100	110
	DHP moyen (cm)								
	12	20	26	30	34	38	40	42	44
Sciage	19	43	49	52	44	60	63	58	59
Pâtes et papiers	68	44	38	35	42	28	25	30	29
Bois énergie	11	7	6	6	7	5	4	5	5
Panneaux de particules	2	6	7	7	7	7	7	7	7

La durée de rétention du carbone dans les produits forestiers ligneux varie selon la catégorie de produits. L'approche *ex ante* utilise un facteur de rétention moyen de carbone sur 100 ans qui est multiplié avec la quantité de carbone pour chaque catégorie de produits. Par exemple, pour les produits de sciage, le carbone sera comptabilisé à 46 % de sa quantité initiale sur une durée de 100 ans (tableau 10). Après 100 ans, il est présumé que le carbone est réémis dans l'atmosphère.

Tableau 10 Facteurs de rétention du carbone en fonction de la catégorie de produits forestiers ligneux pour une période de 100 ans avec l'approche ex ante

Produit forestier ligneux	Facteur de rétention du carbone
Produits du sciage	0,463
Panneaux de particules	0,176
Pâtes et papiers	0,058
Bois énergie	0,0

Source : California Environmental Protection Agency, 2014

Pour l'approche *ex post*, une estimation du bilan annuel de carbone doit être faite en incluant la vie des produits forestiers ligneux (Pingoud et Wagner, 2006). L'hypothèse est que chaque produit forestier ligneux se décompose de façon continue. La vitesse de décomposition est définie par la demi-vie qui est attribuée à chaque produit. Ainsi, une diminution annuelle d'un produit équivaut à une diminution du réservoir de carbone des produits forestiers ligneux et, de ce fait, à une émission de carbone du même ordre de grandeur. Dans les faits, on obtient pour chaque catégorie de produits une courbe dégressive distincte qui tend vers zéro. Le tableau 11 regroupe les paramètres spécifiques de chaque catégorie de produits forestiers ligneux. La pente varie en fonction de la demi-vie des produits forestiers ce qui permet de prédire la quantité annuelle de carbone séquestré dans chacun des produits (Skog, 2008).

Tableau 11 Facteurs de séquestration du carbone dans les produits forestiers ligneux sur une période de 100 ans et demi-vie par produit servant à l'estimation du bilan annuel de carbone pour l'approche ex post

Type d'utilisation selon la classification de Skog :	Maisons multifamiliales	Réparations, rénovations	Papier	N. D.
Produit forestier ligneux :	Produits du sciage	Panneaux de particules	Pâtes et papiers	Bois énergie
Demi-vie ($t_{1/2}$) :	50	25	2,5	1,0

Source : Adapté de K. E. Skog, 2008

4. Méthodes de quantification de la séquestration du carbone

La quantification de la séquestration du carbone a pour but de calculer le nombre de crédits compensatoires pouvant être mis sur le marché du carbone. Dans la présente analyse, le calcul des deux approches menant à un crédit compensatoire diffère.

L'approche *ex ante* tient compte des tonnes de carbone nettes qui se seront accumulées dans la biomasse. Les tonnes de carbone accumulées seront converties en crédits compensatoires qui devront rester séquestrés sur une période de 100 ans. Pour cela, une partie des crédits compensatoires, qui dans cette étude s'élève à 21 %, devra être mise dans un fonds de réserve servant de garantie contre les risques d'inversion. Le maintien du carbone dans la biomasse durant cette période de 100 ans après la vente du dernier crédit compensatoire répond aux exigences du critère de permanence.

En ce qui concerne la méthode de quantification de l'approche *ex post*, elle est conforme à celle des tonnes métriques par année mesurée en watt par mètre carré (W/m^2). Ici, autant la quantité séquestrée que la durée de séquestration sont comptabilisées. Cela permet de quantifier l'impact réel du carbone séquestré sur l'atmosphère, à partir du moment où la séquestration a lieu et pour la durée pendant laquelle elle aura lieu. Au-delà d'une période de séquestration de 100 ans, qui est la période de référence attribuée aux séquestrations biologiques (Western Climate Initiative, 2010), l'effet du carbone n'est plus comptabilisé. On évite ainsi une surestimation de l'effet, peu importe sous quelle forme et dans quel réservoir le carbone est séquestré. On obtient ainsi des fractions de crédits compensatoires qui varient selon la durée et la quantité de séquestration du carbone. Après la vente de crédits compensatoires, plus aucune exigence de maintien du carbone dans la biomasse n'est requise.

Bibliographie

- BOYD, E., M. GUTIERREZ et M. CHANG (2007). “Small-Scale Forest Carbon Projects: Adapting CDM to Low-Income Communities”, *Global Environmental Change*, vol. 17, n° 2, p. 250-259.
- CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2014). *Compliance Offset Protocol U.S. Forest Projects*, [En ligne], Air Resources Board, 112 p.
[<https://www.arb.ca.gov/regact/2014/capandtrade14/ctusforestprojectsprotocol.pdf>]
- CARLSON, D., P. LINGL et R. WONG (2009). *Purchasing Carbon Offsets: A Guide for Canadian Consumers, Businesses, and Organizations*, [En ligne], Vancouver, BC, Canada David Suzuki Foundation & Pembina Institute, 77 p. [<https://www.pembina.org/reports/offset-purchase-guide-v3.pdf>].
- CDP (2014). *Global Corporate Use of Carbon Pricing – Disclosures to Investors*, New York, CDP North America Inc., 59 p.
- CONFÉRENCE EUROPÉENNE DES MINISTRES DES TRANSPORTS (2005). *Table ronde 127 – Le temps et les transports*, [En ligne], Paris, Les éditions de l’OCDE, Centre de recherches économiques, 130 p. [https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/05rt127f_0.pdf]
- CÔTÉ, M.-A., D. GILBERT et S. NADEAU (2012). *Caractérisation des profils, des motivations et des comportements des propriétaires forestiers québécois par territoire d’agence régionale de mise en valeur des forêts privées*, [En ligne], rapport produit pour les agences régionales de mise en valeur des forêts privées et le ministère des Ressources naturelles du Québec, 42 p. + annexes. [<http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/privées/enquete-proprietaires.pdf>].
- DELAGRANGE, S. (2011). *Mise en valeur de sites à potentiel forestier sur terres privées pour une sylviculture intensive à multiples objectifs, rapport final*, Ripon, Québec, Institut québécois d’aménagement de la forêt feuillue, 18 p. + annexes.
- FJELLHEIM, H. et S. SCHJØLSET (2016). *Will EU Carbon Prices Ever Recover? Webinar 08-06-2016*, Thomson Reuters Commodities Community Insights.
- FPIINNOVATIONS FORINTEK (2009). *Adaptation du modèle USINE au classement des billes par classe de qualité sur les dimensions*, [Fichier Excel], Québec. [Non publié].
- GALIK, C. S., J. S. BAKER et J. L. GRINNELL (2009). *Transaction Costs and Forest Management Carbon Offset Potential*, Durham, Duke University, Climate Change Policy Partnership, 15 p.
- GOLLIER, C. (2005). *Calcul économique et risque – Comment intégrer le risque dans le calcul économique?*, [En ligne], Université de Toulouse, 10 p.
[http://www.idei.fr/doc/by/gollier/risque_calcul.pdf]
- MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS (2015). *Guide de formation pour l'utilisateur – Modèle d’évaluation de la rentabilité des investissements sylvicoles (MERIS)*, [En ligne], Québec, Gouvernement du Québec, Bureau de mise en marché des bois, 45 p.
[<https://bmmb.gouv.qc.ca/analyses-economiques/outils-d-analyse/>]
- GOUVERNEMENT DE LA GRANDE-BRETAGNE (2011). *Guidance on estimating carbon values beyond 2050: An interim approach*, [En ligne], Department of Energy and Climate Change, 13 p.
[https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/48108/1_20100120165619_e___carbonvaluesbeyond2050.pdf]

- GOUVERNEMENT DU CANADA (2016). *Communiqué de presse, 3 octobre 2016 – Le gouvernement du Canada annonce une tarification pancanadienne pour la pollution par le carbone*, [En ligne], Montréal (Québec), Environnement et Changement climatique Canada. [<http://nouvelles.gc.ca/web/article-fr.do?nid=1132149>]
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC (2016). *Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre du Québec et programme de plafonnement et d'échange de la Californie – Vente aux enchères conjointe n° 6 de février 2016 – Rapport sommaire des résultats – Publié le 24 février 2016*, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques et California Air Resources Board, 7 p.
- KERCHNER, C. D., et W. S. KEETON (2015). "California's regulatory forest carbon market: Viability for northeast landowners", *Forest Policy and Economics*, vol. 50, p. 70–81.
- KURZ, W. A., et autres (2009). "CBM-CFS3: A Model of Carbon-Dynamics in Forestry and Land-Use Change Implementing IPCC Standards", *Ecological Modelling*, vol. 220, n° 4, p. 480-504.
- LAINESSE, M., et V. AUCLAIR (2013). *Guide d'analyse économique – Évaluation économique intégrée au calcul de possibilités forestières – Modèle d'évaluation économique (MEE)*, Québec, Gouvernement du Québec, Bureau de mise en marché des bois, 58 p.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (2016). *Le système de plafonnement et d'échanges de droits d'émission de gaz à effet de serre du Québec – Foire aux questions Q&R*, [En ligne], Gouvernement du Québec, 20 p. [<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/carbone/documents-spede/questions-reponses.pdf>]
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (2017). *Le marché du carbone, un outil pour la croissance économique verte!*, [En ligne], Gouvernement du Québec, 20 p. [<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/marche-carbone.asp>] (Consulté le 30 janvier 2017).
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES. *Protocole de crédits compensatoires pour les projets de séquestration de carbone en territoire privé québécois – Activités : boisement et reboisement 0.1*, Québec, Gouvernement du Québec, Direction du marché du carbone. [À paraître].
- MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS (2016). *Grille annuelle de taux d'investissement en forêt privée – Année financière 2016-2017*, [En ligne], Québec, Gouvernement du Québec. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/privees/pdf/Grille-annuelle-taux-investissement-foret-privee.pdf>]
- MURRAY, B. C., et autres (2012). *Alternative Approaches to Addressing the Risk of Non-Permanence in Afforestation and Reforestation Projects Under the Clean Development Mechanism*, Durham, Duke University, Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, 72 p.
- PINGOUD, K., et F. WAGNER (2006). « Methane Emissions from Landfills and Carbon Dynamics of Harvested Wood Products: the First-Order Decay Revisited », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 11, n° 5, p. 961–978.

- PRÉGENT, G., G. PICHER et I. AUGER (2010). *Tarifs de cubage, tables de rendement et modèles de croissance pour les plantations d'épinette blanche au Québec*, Québec, Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière, 94 p. (Mémoire de recherche;160).
- QUINET, A., et autres (2008). *La valeur tutélaire du carbone*, Centre d'analyse stratégique, 110 p. (Rapports et documents; 16).
- RODRIGUES, L. L. (2011). *A Cost Effectiveness Analysis of Managing Small Forestland for Carbon Credits and Timber*, Thesis, Evergreen State College, 47 p.
- RUSSELL-ROY, E. T., et autres (2014). "Rehabilitation Forestry and Carbon Market Access Onhigh-Graded Northern Hardwood Forests", *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 44, n° 6, p. 614-627.
- SKOG, K. E. (2008). "Sequestration of Carbon in Harvested Wood Products for the United States", *Forest Products Journal*, vol. 56, n° 6, p. 56-72.
- SUSTAINABLE PROSPERITY (2013). *Shadow Carbon Pricing in the Canadian Energy Sector –Policy Brief*, [En ligne], Ottawa, Université d'Ottawa, 18 p.
[<http://www.sustainableprosperity.ca/sites/default/files/publications/files/Shadow%20Carbon%20Pricing%20in%20the%20Canadian%20Energy%20Sector.pdf>]
- THOMAS, S., et autres (2010). "Why Are There so Few Afforestation and Reforestation Clean Development Mechanism projects?", *Land Use Policy*, vol. 27, n° 3, p. 880-887.
- VALATIN, G. (2011). *Forests and Carbon: Valuation, Discounting and Risk Management, Research Report*, [En ligne], Edinburgh, Scotland, Forestry Commission, 32 p.
[[http://www.forestry.gov.uk/pdf/FCRP012.pdf/\\$FILE/FCRP012.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/FCRP012.pdf/$FILE/FCRP012.pdf)]
- WESTERN CLIMATE INITIATIVE (2010). *Offset Definition (Task 1.1) and Eligibility Criteria (Task 1.2)*, [En ligne]. [[http://www.westernclimateinitiative.org/document-archives/Offsets-Committee-Documents/Offset-Definition-\(Task-1.1\)-and-Eligibility-Criteria-\(Task-1.2\)-White-Paper/](http://www.westernclimateinitiative.org/document-archives/Offsets-Committee-Documents/Offset-Definition-(Task-1.1)-and-Eligibility-Criteria-(Task-1.2)-White-Paper/)].
- YONAVJAK, L., P. SWEDEEN et J. TALBERTH (2011). *Forests for Carbon: Exploring Forest Carbon Offsets in the U.S. South*, Washington, DC, World Resources Institute, 19 p. (WRI Southern Forests for the Future Incentives Series; 6).

