

Effet de la stratégie d'aménagement sur la quantité de carbone séquestré sur le territoire forestier aménagé québécois

Avis du Forestier en chef
FEC-AVIS-06-2015

Bureau du forestier en chef



Direction

Marc Plante, ing.f.

Coordination

Maxime Renaud, ing.f. et Nathalie Perron, biol., Ph.D.

Rédaction et analyse

Julie Poulin, biol., M.Sc.

Analyse

Martin Côté, ing.f.

Collaboration

Pierre Bernier, ing.f., Ph.D., Centre de foresterie des Laurentides

Frédéric Doyon, ing.f., Ph.D., Université du Québec en Outaouais

Claude Fortin, ing.f., ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

Frank Muessenberger, ing.f., M.Sc., ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs

David Paré, ing.f., Ph.D., Centre de foresterie des Laurentides

Catherine Potvin, biol., Ph.D., Université McGill

Frédéric Raulier, Ph.D., Université Laval

Révision linguistique

Claire Fecteau

Référence

Bureau du forestier en chef. 2015. Effet de la stratégie d'aménagement sur la quantité de carbone séquestré sur le territoire forestier aménagé québécois. FEC-AVIS-06-2015. Roberval, Qc, 18 p. + annexes.

La présente publication est accessible dans Internet à l'adresse suivante : www.forestierenchef.gouv.qc.ca

Bureau du forestier en chef

845, boulevard Saint-Joseph

Roberval (Québec) G8H 2L6

Téléphone : 418 275-7770

Télécopieur : 418 275-8884

Courriel : Avis@fec.gouv.qc.ca

www.forestierenchef.gouv.qc.ca



Roberval, le 28 juillet 2015

Monsieur Laurent Lessard
Ministre des Forêts, de la Faune et des Parcs
5700, 4^e Avenue Ouest, A 301
Québec (Québec) G1H 6R1

Monsieur le Ministre,

Conformément à l'article 47 de la Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier, j'ai le plaisir de vous transmettre l'avis sur l'*Effet de la stratégie d'aménagement sur la quantité de carbone séquestré sur le territoire forestier aménagé québécois*. Ce mandat visait à évaluer la pertinence de développer des orientations gouvernementales en lien avec la gestion du carbone forestier.

Veuillez agréer, Monsieur le Ministre, l'expression de mes sentiments distingués.

Gérard Szaraz, ing.f., M.Sc. M.A.P.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| 1. Faits saillants | 5 |
| 2. Mise en contexte | 6 |
| 3. Objectif et portée de l'Avis | 7 |
| 4. Méthodologie | 8 |
| 4.1. Scénarios de référence | 8 |
| 4.2. Scénario d'évolution naturelle | 9 |
| 4.3. Scénario d'optimisation du carbone en forêt | 9 |
| 4.4. Bilan de carbone | 10 |
| 4.5. Indicateurs de la stratégie d'aménagement | 10 |
| 5. Résultats | 11 |
| 5.1. Choix du scénario de référence | 11 |
| 5.2. Scénario d'évolution naturelle | 11 |
| 5.3. Scénario d'optimisation du carbone forestier | 12 |
| 5.3.1. Effet de l'aménagement forestier | 12 |
| 5.3.2. Effet de la diminution du volume de bois récolté | 15 |
| 5.3.3. Effet de la structure d'âge et de la composition | 15 |
| 5.4. Stratégie d'aménagement | 15 |
| 6. Conclusion | 16 |
| 7. Recommandations du Forestier en chef | 17 |
| Références | 18 |
| Annexes | 19 |

1. Faits saillants

L'augmentation des concentrations de carbone atmosphérique contribue aux changements climatiques. En foresterie, les mesures d'atténuation d'émission de carbone vers l'atmosphère consistent à augmenter la séquestration de carbone dans les forêts (fonction captage), à maintenir le carbone séquestré sur une période de temps (fonction stockage) et augmenter l'utilisation des produits forestiers.

Les stratégies d'aménagement ont un effet sur le potentiel de séquestration des forêts. Les stratégies d'aménagement qui favorisent la séquestration du carbone en forêt sont principalement le boisement, reboisement, l'allongement de l'intervalle de temps entre les interventions et les coupes partielles. Ainsi, l'aménagement forestier peut contribuer à augmenter la quantité de carbone de l'écosystème forestier tout en maintenant un niveau de récolte qui rencontre les besoins de la société.

Cet avis vise à évaluer l'effet de la stratégie d'aménagement sur la quantité de carbone séquestré sur le territoire forestier aménagé québécois. Trois objectifs en découlent :

1. convenir du scénario de référence ;
2. quantifier le carbone séquestré sur un territoire forestier aménagé et définir la capacité à modifier la quantité de carbone séquestré ;
3. identifier les modifications potentielles à apporter aux stratégies d'aménagement.

Le scénario de référence retenu est la période de planification en cours, soit 2013-2018. Nos résultats montrent qu'en récoltant le même volume de bois à chaque période, une modification de la stratégie d'aménagement permet d'augmenter la quantité de carbone séquestré dans l'écosystème forestier aménagé public. Sur un horizon de 100 ans, l'augmentation varie de 2 à 17 tonnes de carbone à l'hectare, selon l'unité d'aménagement. Cette augmentation représente plus de 93 millions de tonnes de carbone pour les 10 unités d'aménagement de notre analyse, soit une augmentation moyenne de près de 4 %. La principale modification apportée à la stratégie d'aménagement est l'augmentation des superficies en plantation.

À la suite de notre évaluation, le Forestier en chef recommande :

- d'évaluer le potentiel de différentes stratégies d'aménagement, afin d'augmenter la quantité de carbone dans les écosystèmes forestiers québécois;
- d'évaluer la pertinence d'établir des cibles afin d'augmenter la quantité de carbone dans les forêts aménagées et les produits forestiers;
- d'évaluer la pertinence d'établir le cadre légal et réglementaire permettant aux secteurs forestiers public et privé de contribuer au marché du carbone québécois.



2. Mise en contexte

L'augmentation des concentrations de carbone atmosphérique contribue aux changements climatiques. Les efforts d'atténuation des effets des changements climatiques consistent à réduire les émissions et à diminuer la concentration de CO₂ atmosphérique. Les forêts jouent un rôle important dans le cycle du carbone¹. Elles sont le deuxième plus grand réservoir de carbone après les océans². Elles sont également responsables de la séquestration du tiers des émissions de carbone atmosphérique provenant des énergies fossiles³. En foresterie, les mesures d'atténuation d'émission de carbone vers l'atmosphère consistent à augmenter la séquestration de carbone dans les forêts et dans les produits forestiers.

L'aménagement forestier peut avoir un effet sur la quantité de carbone séquestré dans les écosystèmes forestiers et sur le taux de séquestration de carbone⁴. Généralement, puisque les vieilles forêts sont de grands réservoirs, la quantité de carbone des forêts non aménagées est supérieure à celle des forêts aménagées⁵. Toutefois, le carbone séquestré dans les produits forestiers et leur utilisation en remplacement de matériaux dont la production nécessite davantage d'émission de gaz à effet de serre (substitution) contribue à diminuer la concentration de carbone atmosphérique⁶. Ainsi, l'aménagement forestier peut contribuer à augmenter la quantité de carbone de l'écosystème forestier tout en maintenant un niveau de récolte qui rencontre les besoins de la société⁷. Les stratégies d'aménagement qui visent principalement le boisement et le reboisement, l'allongement de l'intervalle de temps entre les interventions⁸ et les coupes partielles favorisent la séquestration du carbone en forêt⁹.

La future Stratégie d'aménagement durable des forêts¹⁰ énonce que le Bureau du forestier en chef a la responsabilité de développer son expertise quant à la comptabilisation et l'intégration du carbone forestier dans la gestion forestière. De plus, le Bureau du forestier en chef s'est engagé à intégrer la comptabilisation du carbone forestier pour le calcul de la période 2018-2023¹¹. Ainsi, le Bureau du forestier en chef a mis sur pied une équipe responsable de développer des outils et des méthodes afin de mener des analyses qui évalueront l'effet des stratégies sur la dynamique du carbone forestier.

¹ Kurz *et al.* (2013).

² Janssen *et al.* (2003).

³ Pan *et al.* (2003).

⁴ Kauppi *et al.* (2001), Pussinen *et al.* (2002), Ter-Mikaelian *et al.* (2013).

⁵ Garcia-Gonzalo *et al.* (2007), Neilson *et al.* (2008).

⁶ Malmshheimer *et al.* (2008), Smith *et al.* (2014), Lemprière *et al.* (2013).

⁷ Nabuurs *et al.* (2007).

⁸ Cette expression est utilisée dans cet avis pour regrouper les termes « rotation », pour les coupes partielles, et « révolution » pour les coupes totales, afin de faire référence à l'échelle temporelle du développement d'un peuplement aménagé.

⁹ Garcia-Gonzalo *et al.* (2007), Sathre *et al.* (2010), Werner *et al.* (2010), Nabuurs *et al.* (2007).

¹⁰ Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (2010).

¹¹ Ces orientations figurent au Plan stratégique 2012-2016 (http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2013/03/BFC_PlanStrategique-F4W.pdf).



3. Objectif et portée de l'Avis

Cet avis vise à évaluer l'effet de la mise en place de différentes stratégies d'aménagement sur la séquestration de carbone du territoire forestier aménagé québécois. Trois objectifs en découlent :

1. convenir du scénario de référence;
2. quantifier le carbone séquestré sur un territoire forestier aménagé et définir la capacité à modifier la quantité de carbone séquestré;
3. identifier les modifications potentielles à apporter aux stratégies d'aménagement.

Cet avis est de portée provinciale. L'analyse porte sur 10 unités d'aménagement (figure 1) qui représentent les combinaisons de type de couvert et de classe d'âge rencontrée sur le territoire forestier québécois (tableau 1). Ces caractéristiques agissent sur la capacité de séquestration du carbone des écosystèmes forestiers. Pour des limitations techniques, l'analyse exclut les effets des perturbations naturelles. L'analyse porte uniquement sur la superficie aménagée du territoire. Conséquemment, cette analyse ne tient pas compte du potentiel de séquestration du boisement de territoires forestiers publics non productifs, tels que les dénudés secs et les sites perturbés. De plus, cette analyse ne tient pas compte du potentiel de séquestration du boisement de territoires forestiers et non forestiers sur le territoire privé québécois (territoires en zone agricole (ex. : friche), territoires municipaux). Enfin, nous n'avons pas considéré les bénéfices reliés à la séquestration dans les produits du bois ainsi qu'à la substitution d'autres matériaux de construction ou sources d'énergie par de la fibre de bois.

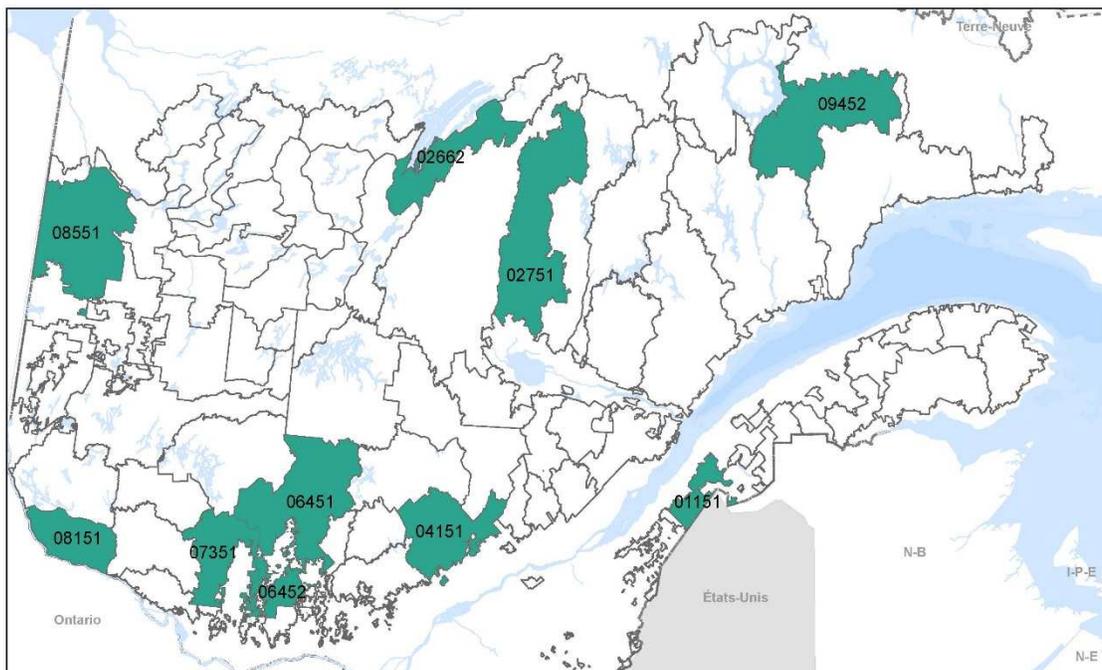


Figure 1. Localisation des 10 unités d'aménagement sélectionnées.

Tableau 1. Proportion de la superficie aménagée* des unités d'aménagement analysées et proportion par stade de développement**.

| Région par type de couvert dominant | Unité d'aménagement | Superficie aménagée (ha) | Stade de développement (%) | |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|-------|
| | | | Jeune | Vieux |
| Résineux | | | | |
| Nord-du-Québec | 026-62 | 216 849 | 53 | 47 |
| | 085-51 | 578 008 | 76 | 24 |
| Saguenay–Lac-Saint-Jean | 027-51 | 910 843 | 74 | 26 |
| Côte-Nord | 094-52 | 654 666 | 14 | 86 |
| Mixte | | | | |
| Bas-Saint-Laurent | 011-51 | 152 135 | 82 | 18 |
| Laurentides | 064-51 | 785 302 | 80 | 20 |
| Abitibi-Témiscamingue | 081-51 | 296 784 | 60 | 40 |
| Mauricie | 041-51 | 410 006 | 57 | 43 |
| Feuilleu | | | | |
| Laurentides | 064-52 | 129 315 | 59 | 41 |
| Outaouais | 073-51 | 326 373 | 56 | 44 |

* Incluant de petites superficies ne pouvant pas être récoltées telles que des pentes fortes ou des refuges biologiques.

** Jeune : 0 à 80 ans et jeune irrégulier/inéquien; vieux : plus de 80 ans et vieux irrégulier/inéquien.

4. Méthodologie

Nous avons utilisé les modèles du calcul des possibilités forestières de la période 2013-2018. Nous avons réduit l'horizon de modélisation à 100 ans afin d'augmenter la vitesse de résolution. Les contraintes budgétaires, sociales et environnementales ont été maintenues.

4.1. Scénarios de référence

La première étape d'un projet de séquestration de carbone est d'identifier le scénario de référence. Le scénario de référence est déterminant pour évaluer l'effet d'un scénario d'aménagement qui vise à augmenter la quantité de carbone séquestré. Généralement, les auteurs des études consultées utilisent le calendrier de récolte planifié en absence d'actions pour séquestrer davantage de carbone¹².

Dans le cadre de cette analyse, un comité¹³ a été mis en place pour définir le scénario de référence de l'analyse. Afin d'assurer que le choix du scénario de référence était représentatif des activités forestières régulières et compte tenu du contexte économique difficile des dernières années dans le secteur forestier québécois, ce comité a identifié trois scénarios de référence, soit :

- i) la période 1990-2004, qui représente l'activité forestière historique avant la crise forestière;

¹² Lemprière et al. (2002), Neilson et al. (2008).

¹³ Ce comité était composé de Julie Poulin, Martin Côté, Jean-François Carle et Lise Guay du Bureau du forestier en chef, Frank Muessenberger, Marc Leblanc et Julie Thiboutot du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Claude Fortin du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte aux changements climatiques, Pierre Bernier du Centre de foresterie des Laurentides, Frédéric Doyon de l'Université du Québec en Outaouais, Catherine Potvin de l'Université McGill, Frédéric Raulier de l'Université Laval, ainsi que Christian Taillon et Pierre Labrecque de la CRÉ des Outaouais.



- ii) la période 2008-2012, qui représente l'activité forestière du passé récent;
- iii) la période 2013-2018, qui représente l'activité forestière de la période de planification en vigueur.

Pour cette analyse, nous avons sélectionné l'unité d'aménagement 073-51, située en Outaouais. Parce qu'il est impossible de recréer un modèle avec la stratégie d'aménagement passée, nous avons reconduit la stratégie d'aménagement de la période 2013-2018. Cependant, pour chaque scénario de référence potentiel, nous avons fixé la récolte selon la moyenne des superficies récoltées par grande famille de traitements sylvicoles (tableau 2).

Tableau 2. Superficie annuelle récoltée de l'unité d'aménagement 073-51 selon le scénario de référence potentiel.

| Traitement sylvicole | Période 1990-2004 | | Période 2008-2012 | | Période 2013-2018* | |
|--------------------------|-------------------|----|-------------------|----|--------------------|----|
| | (ha/an) | % | (ha/an) | % | (ha/an) | % |
| Régime irrégulier | | | | | | |
| Coupes partielles | 4 425 | 77 | 2 734 | 76 | 3 180 | 58 |
| Régime régulier | | | | | | |
| Éclaircie commerciale | 126 | 2 | 120 | 3 | 220 | 4 |
| Coupes totales | 1 214 | 21 | 771 | 21 | 2 090 | 38 |
| Total | 5 769 | | 3 625 | | 5 490 | |

* La superficie à récolter pour la période 2013-2018 provient du *Rapport de revue externe* publié par le Bureau du forestier en chef au printemps 2013.

4.2. Scénario d'évolution naturelle

Le scénario d'évolution naturelle vise à quantifier le potentiel de séquestration de carbone de nos modèles en absence d'aménagement¹⁴.

4.3. Scénario d'optimisation du carbone en forêt

Le scénario d'optimisation du carbone vise à maintenir le volume de bois récolté prévu au scénario de référence, mais modifiant la stratégie d'aménagement de façon à maximiser, dans les limites du modèle, la quantité de carbone séquestré en forêt¹⁵. Pour ce faire, nous avons utilisé les équations de Boudewyn et al. (2007) pour calculer la quantité de biomasse à partir du volume marchand de chaque essence. Ces équations sont les mêmes que celles utilisées par le modèle de comptabilisation du carbone forestier CBM-SFC3 du Service canadien des forêts. Selon ces équations, la biomasse comprend le volume des tiges marchandes, mais également le volume des tiges non marchandes, des racines, des branches, du feuillage et de l'écorce. La quantité de biomasse est ensuite traduite en quantité de carbone.

¹⁴ La courbe d'évolution d'un peuplement couvre l'ensemble de l'horizon du calcul, incluant la sénescence.

¹⁵ Dans le cadre d'un calcul des possibilités forestières, l'exercice consiste à optimiser le volume récolté. Dans ce scénario, cet objectif est remplacé par l'optimisation du carbone dans la biomasse. Le fait de maintenir le volume de bois récolté permet d'éviter les fuites, une des trois conditions essentielles d'un projet de carbone. Les fuites surviennent lorsque le projet cause un déplacement des activités à l'extérieur du territoire (Brown *et al.* 2000, Schwarze *et al.* 2002). Le maintien du niveau de récolte permet également de prendre en compte indirectement la séquestration de carbone dans les produits forestiers.



4.4. Bilan de carbone

Nous avons utilisé le modèle de comptabilisation du carbone forestier CBM-SFC3 du Service canadien des forêts pour produire les bilans de carbone séquestré sur un territoire. Pour ce faire, nous avons adapté les modèles du calcul des possibilités forestières¹⁶. Les résultats sont présentés pour l'ensemble des réservoirs de l'écosystème forestier¹⁷.

4.5. Indicateurs de la stratégie d'aménagement

Nous avons sélectionné dix indicateurs de la stratégie d'aménagement afin de comparer le scénario d'optimisation du carbone au scénario de référence. L'évolution de ces indicateurs par unité d'aménagement est présentée aux annexes 1 à 10. Ces indicateurs portent principalement sur la plantation, la coupe partielle et l'intervalle de temps entre les récoltes :

- a) **Le coût de la stratégie d'aménagement** : cet indicateur nous permet d'analyser les variations du coût de la stratégie par rapport à la limite budgétaire. Le budget disponible peut limiter les interventions sylvicoles qui favorisent l'augmentation de la quantité de carbone, ces dernières étant généralement plus coûteuses (ex. : la plantation);
- b) **Le coût par famille de traitements sylvicoles** : cet indicateur nous permet d'analyser les variations du budget alloué par famille de traitement, soit la plantation (scarifiage, mise en terre), l'éducation (dégagement, nettoyage, éclaircie précommerciale), la coupe partielle du régime régulier (éclaircie commerciale) et la coupe partielle du régime irrégulier (coupe progressive irrégulière, coupes de jardinage);
- c) **La superficie traitée en plantation;**
- d) **La proportion de la superficie admissible traitée en plantation** : afin de limiter des écarts irréalistes d'une période à l'autre, nous limitons la superficie en plantation à plus ou moins 10 % de la période précédente. Ainsi, cet indicateur nous permet d'analyser si la stratégie d'aménagement maximise ou minimise les superficies à reboiser;
- e) **La superficie traitée en coupe partielle;**
- f) **Le pourcentage de la superficie admissible qui est traitée en coupe partielle** : cet indicateur nous permet d'analyser si la superficie traitée en coupe partielle est limitée par la superficie admissible;
- g) **Le volume récolté par un traitement sylvicole du régime régulier;**
- h) **Le volume récolté par un traitement sylvicole du régime irrégulier;**
- i) **L'âge moyen des peuplements récoltés en régime régulier** : cet indicateur nous permet d'analyser si la stratégie d'aménagement retarde la récolte des peuplements afin de maintenir des arbres de plus grandes dimensions sur pied;
- j) **La surface terrière moyenne des peuplements récoltés en régime irrégulier** : cet indicateur nous permet d'analyser si la stratégie d'aménagement favorise un allongement de la rotation afin de maintenir des arbres de plus grandes dimensions sur pied.

¹⁶ L'équipe du Projet Carbone du Bureau du forestier en chef a développé un outil dans le logiciel Access afin de rendre compatibles nos modèles Woodstock avec CBM-SFC3.

¹⁷ La biomasse aérienne et souterraine, le sol et la matière organique morte.



5. Résultats

5.1. Choix du scénario de référence

Les trois scénarios de référence potentiels montraient un écart maximal moyen de la quantité de carbone de 5 % sur l'ensemble de l'horizon d'analyse (figure 2). Puisque l'évolution de la quantité de carbone n'était pas différente de celles des autres périodes de référence, le comité a convenu d'utiliser le scénario de référence de la période 2013-2018.

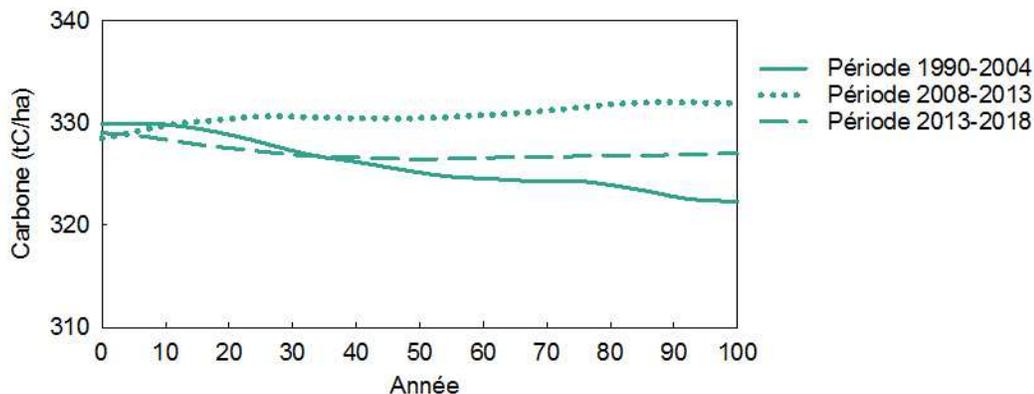


Figure 2. Évolution de la quantité de carbone de l'écosystème des trois scénarios de référence potentiels.

5.2. Scénario d'évolution naturelle

La quantité de carbone séquestré et maintenu dans un écosystème forestier, évalué à l'aide du scénario d'évolution naturelle, augmente dans le temps pour toutes les unités d'aménagement sauf pour la plus vieille, la 094-52 (figure 3). L'évolution de la quantité de carbone séquestré est fonction de la structure d'âge initiale d'un territoire¹⁸. Les vieilles forêts, étant de grands réservoirs, ont peu de potentiel d'augmentation de la quantité de carbone.

Les écosystèmes composés d'essences feuillues ont une plus grande quantité de carbone¹⁹. Ainsi, la quantité de carbone est plus élevée pour les unités d'aménagement comprenant des essences feuillues (figure 3).

¹⁸ Ter-Mikaelian et al. (2013).

¹⁹ Malmshheimer et al. (2008).

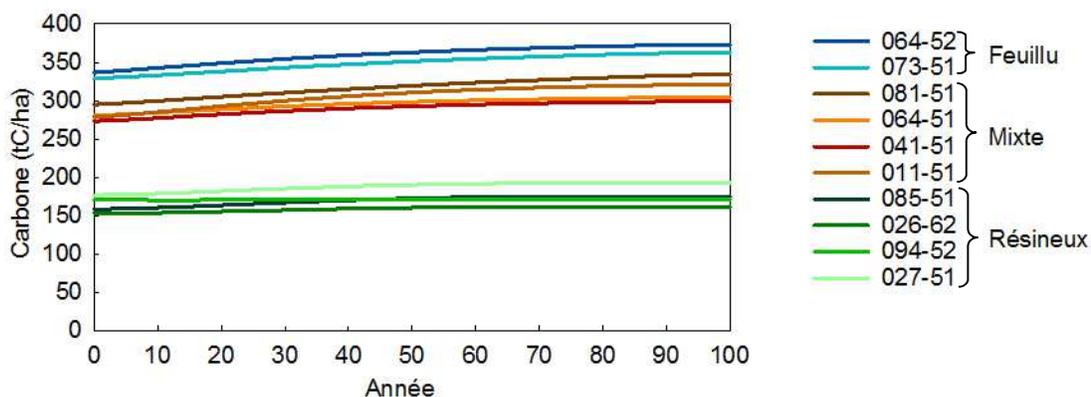


Figure 3. Évolution de la quantité de carbone dans l'écosystème forestier en absence d'interventions sylvicoles par unité d'aménagement. Les unités d'aménagement sont regroupées selon leur type de couvert.

5.3. Scénario d'optimisation du carbone forestier

5.3.1. Effet de l'aménagement forestier

Le scénario d'optimisation du carbone permet d'augmenter la quantité de carbone de toutes les unités d'aménagement par rapport au scénario de référence (tableau 3, figure 4). Ainsi, en récoltant le même volume de bois à chaque période, une modification de la stratégie d'aménagement permet d'augmenter la quantité de carbone séquestré.

L'augmentation de la quantité de carbone nécessite plusieurs décennies. Durant les premières 25 années, nous observons une augmentation d'au plus 2 tonnes de carbone à l'hectare (tableau 3). Jusqu'à 50 ans, cette augmentation peut atteindre 4 tonnes de carbone à l'hectare. Sur un horizon de 100 ans, l'augmentation varie de 3 à 17 tonnes de carbone à l'hectare, selon l'unité d'aménagement. Au Nouveau-Brunswick, Neilson et al. (2008) montre également une augmentation de 3 tonnes de carbone à l'hectare après 80 années d'aménagement en maximisant la quantité de carbone en forêt.



Tableau 3. Augmentation de la quantité de carbone du scénario d'optimisation en comparaison du scénario de référence selon 4 périodes d'analyse.

| Unité d'aménagement | Quantité initiale (tC/ha) | Augmentation (tC/ha) | | | |
|---|------------------------------|----------------------|----------|----------|-----------|
| | | 0-25 ans | 0-50 ans | 0-75 ans | 0-100 ans |
| Type de couvert résineux dominé par de plus jeunes peuplements | | | | | |
| 027-51 | 177 | 0 | 1 | 3 | 6 |
| 085-51 | 158 | 1 | 3 | 7 | 13 |
| Type de couvert résineux dominé par de plus vieux peuplements | | | | | |
| 026-62 | 121 | 1 | 2 | 4 | 8 |
| 094-52 | 171 | 0 | 1 | 2 | 2 |
| Type de couvert mixte dominé par de plus jeunes peuplements | | | | | |
| 011-51 | 278 | 1 | 3 | 6 | 10 |
| 064-51 | 281 | 2 | 4 | 7 | 14 |
| Type de couvert mixte dominé par de plus vieux peuplements | | | | | |
| 041-51 | 273 | 1 | 4 | 10 | 17 |
| 081-51 | 294 | 0 | 0 | 3 | 4 |
| Type de couvert feuillu dominé par de plus vieux peuplements | | | | | |
| 064-52 | 337 | 2 | 3 | 5 | 7 |
| 073-51 | 329 | 0 | 4 | 8 | 12 |

La quantité de carbone du territoire forestier aménagé pourrait être plus élevée. Les scénarios sylvicoles de nos modèles ne sont pas élaborés dans l'optique d'augmenter la quantité de carbone de l'écosystème tel que favoriser la régénération en essences feuillues ou encore le carbone du sol. De plus, nos modèles ne comportent pas de stratégie de reboisement de territoires forestiers improductifs, tels que les dénudés secs, les brûlis non régénérés ou autres superficies dépourvues de couvert forestier. Enfin, le fait de maintenir le volume de bois récolté à celui du scénario de référence limite l'ampleur des modifications possibles à la stratégie d'aménagement.



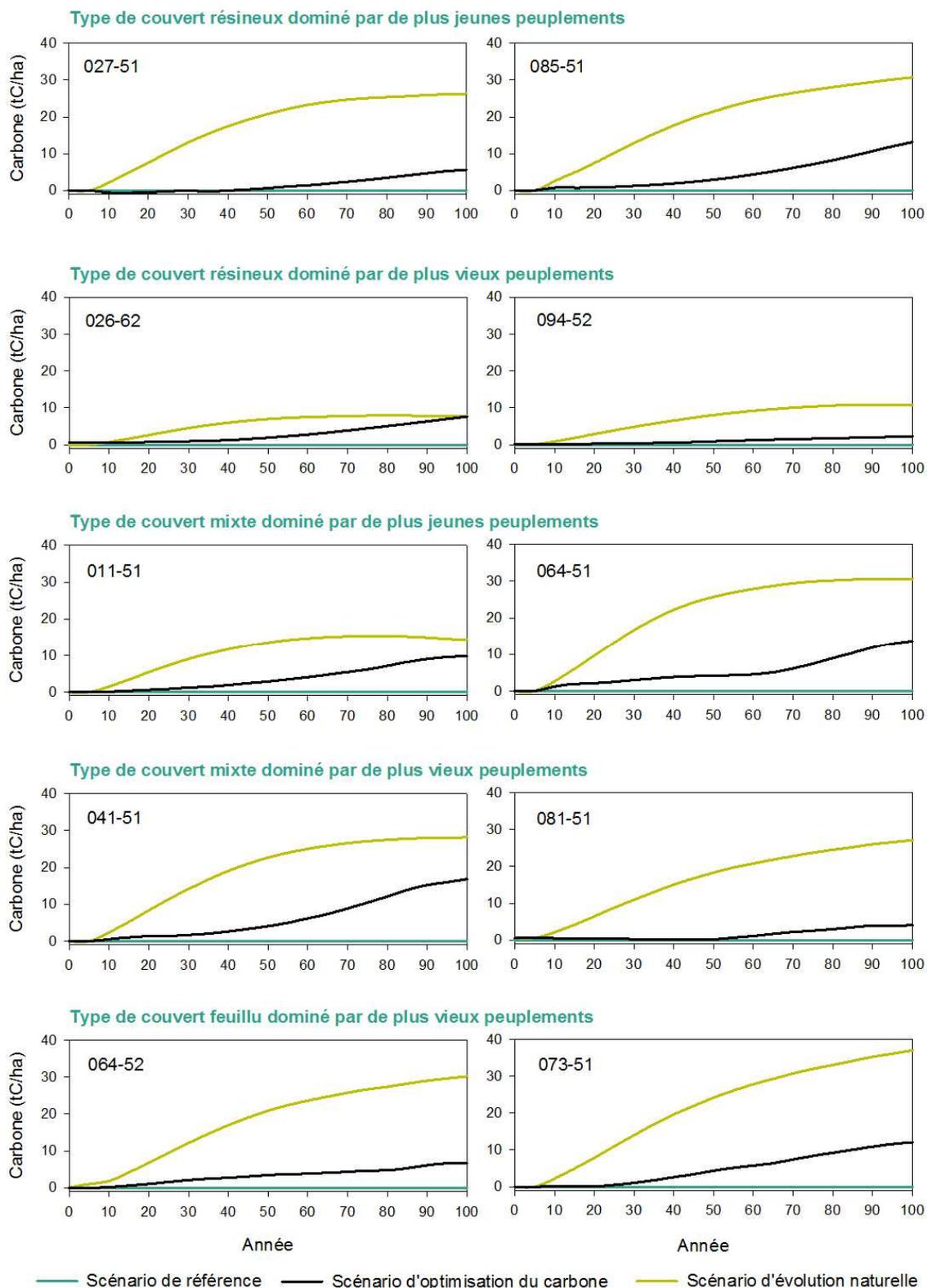


Figure 4. Évolution de la quantité de carbone dans l'écosystème en comparaison au scénario de référence sur un horizon de 100 ans.



5.3.2. Effet de la diminution du volume de bois récolté

Une diminution du volume de bois récolté permet d'augmenter la quantité de carbone en forêt. Toutefois, selon la littérature²⁰, lorsque l'analyse inclut le réservoir des produits forestiers ainsi que la substitution, l'aménagement forestier permet de diminuer les concentrations de CO₂ atmosphérique.

5.3.3. Effet de la structure d'âge et de la composition

Tel que mentionné précédemment, l'évolution de la quantité de carbone dépend de la structure d'âge initiale et de la composition²¹. Nos résultats montrent effectivement que les unités d'aménagement dominées par de plus vieux peuplements résineux ont un moins grand potentiel d'augmentation de la quantité de carbone. L'unité d'aménagement la plus vieille, soit la 094-52, a le plus faible potentiel d'augmentation. Les unités d'aménagement dont le type de couvert dominant est feuillu ou mixte montrent les plus grandes augmentations de la quantité de carbone (figure 4).

5.4. Stratégie d'aménagement

Les stratégies d'aménagement visent principalement l'augmentation de la superficie en plantation (se référer aux annexes 1 à 10). Cette stratégie est particulièrement favorisée durant la première moitié de l'horizon de planification. Généralement, la superficie traitée en plantation est maximisée (figure d des annexes) jusqu'à ce qu'elle soit limitée par le budget (figure c des annexes).

Les tendances sont contradictoires en ce qui concerne les coupes partielles et le délai entre les récoltes (tableau 4). Selon nos résultats, la proportion en coupes partielles parfois augmente, se maintient ou même diminue. Notre analyse montre également peu de modification de l'âge moyen ou de la surface terrière moyenne récoltée. Plusieurs études rapportent que les coupes partielles²² et la fréquence de récolte²³ sont importantes lorsque l'aménagement vise une plus grande quantité de carbone en forêt. L'étude de Neilson et al. (2008) montre une augmentation de l'âge de révolution lorsque le volume récolté est diminué de 10 %. Pilli et al. (2013) rapporte également que la longueur de l'intervalle de récolte doit être augmentée pour maintenir le réservoir forestier. En forêt tempérée, Nunery et Keeton (2010) démontre que la structure forestière résiduelle et la fréquence de récolte sont importantes lorsque l'aménagement vise une plus grande quantité de carbone en forêt. Garcia-Gonzalo et al. (2007) montre que les coupes partielles²⁴ favorisent une plus grande quantité de carbone en forêt. L'augmentation de la productivité escomptée d'une plantation par rapport à un peuplement naturel, d'environ 30 à 85 %, limite probablement le recours à ces stratégies de rechange. Neilson et al. (2008) suggère également qu'une productivité plus élevée de leur plantation n'aurait pas permis d'observer une augmentation de l'âge de révolution.

²⁰ Smyth *et al.* (2014), Lamprière *et al.* (2013), Malmshemer *et al.* (2008).

²¹ Laganière *et al.* (2015), Ter-Mikaelian *et al.* (2013).

²² Garcia-Gonzalo *et al.* (2007).

²³ Neilson *et al.* (2008), Pilli *et al.* (2013), Nunery et Keeton (2010).

²⁴ Garcia-Gonzalo *et al.* (2007).



Tableau 4. Modification des superficies en plantation, des superficies traitées par une coupe partielle et l'intervalle de temps* entre les récoltes du scénario d'optimisation du carbone par rapport au scénario de référence**.

| Unité d'aménagement | Plantation | Coupe partielle | Intervalle de temps |
|---|------------|-----------------|---------------------|
| Type de couvert résineux dominé par de plus jeunes peuplements | | | |
| 027-51 | ▲ | ▲ | ≈ |
| 085-51 | ▲ | ▼▲ | ≈▼ |
| Type de couvert résineux dominé par de plus vieux peuplements | | | |
| 026-62 | ▲ | ≈ | ▲▼ |
| 094-52 | ▲▼ | ▲▼ | ≈ |
| Type de couvert mixte dominé par de plus jeunes peuplements | | | |
| 011-51 | ≈ | ▼ | ▼▲ |
| 064-51 | ▲ | ▼ | ≈ |
| Type de couvert mixte dominé par de plus vieux peuplements | | | |
| 041-51 | ▲ | ▲ | ▲ |
| 081-51 | ▲ | ▼ | ▲ |
| Type de couvert feuillu dominé par de plus vieux peuplements | | | |
| 064-52 | ▲ | ▼ | ▼▲ |
| 073-51 | ▲ | ▼ | ▼ |

* Mesuré avec l'âge moyen des peuplements récoltés pour le régime régulier et la surface terrière moyenne des peuplements récoltés pour le régime irrégulier.

** Se référer aux annexes 1 à 10 pour l'évolution de ces indicateurs par unité d'aménagement.

6. Conclusion

Notre analyse a permis de démontrer qu'il est possible d'augmenter la quantité de carbone forestier de l'écosystème forestier en modifiant la stratégie d'aménagement. Cette augmentation est possible en maintenant la récolte de matière ligneuse pour rencontrer les besoins socio-économiques. L'augmentation de la quantité de carbone de quelques tonnes par hectare est cependant modeste. En effet, pour les 10 unités d'aménagement de cette analyse, cette augmentation représente 93 millions de tonnes après 100 ans, soit près de 4 %. Cette situation refléterait la prépondérance d'un aménagement extensif.

Des analyses supplémentaires sont nécessaires afin d'améliorer notre compréhension des modifications de la stratégie d'aménagement à apporter lorsque l'objectif d'augmenter la séquestration de carbone et le maintien du carbone séquestré dans un écosystème est poursuivi. De plus, une analyse du potentiel des territoires non aménagés, tels que les dénudés secs et autres superficies dépourvues d'un couvert forestier, permettrait d'obtenir un meilleur portrait du potentiel d'augmenter la quantité de carbone sur le territoire forestier du domaine de l'État et privé.

Enfin, au Québec, autant sur le territoire privé que public, le cadre légal et réglementaire permettant au secteur forestier de contribuer au marché du carbone est inexistant. Une fois ce



cadre disponible, l'analyse du carbone admissible au marché du carbone québécois devra être réalisée afin de mieux préciser le réel potentiel du territoire forestier à générer des crédits de carbone compensatoires.

7. Recommandations du Forestier en chef

Les forêts jouent un rôle important dans le cycle naturel du carbone. Cet avis est une contribution pour orienter la gestion du carbone forestier dans l'aménagement durable des forêts, en lien avec la lutte contre les changements climatiques. À la lumière de cette évaluation, je recommande :

- d'évaluer le potentiel des stratégies d'aménagement suivantes, afin d'augmenter la quantité de carbone dans les écosystèmes forestiers québécois :**
 - **l'utilisation des territoires improductifs** – Ces territoires sont les landes, les brûlis non régénérés et toutes autres superficies dépourvues d'un couvert forestier (ex. : friche en zone agricole). Cette analyse permettrait d'obtenir un meilleur portrait du potentiel de séquestration du territoire forestier du domaine de l'État et du territoire privé;
 - **l'utilisation des coupes partielles** – Les coupes partielles ont le potentiel d'améliorer le bilan de carbone. Une meilleure connaissance de leurs effets sur la dynamique du carbone s'avère nécessaire pour les écosystèmes forestiers québécois;
 - **la sélection des essences** – Une meilleure compréhension de l'effet de la composition sur la dynamique du carbone s'avère également nécessaire pour les écosystèmes forestiers québécois;
- d'évaluer la pertinence d'établir des cibles afin d'augmenter la quantité de carbone dans les forêts aménagées et dans les produits forestiers.** Ainsi, l'aménagement forestier québécois pourrait contribuer à diminuer la concentration de gaz à effet de serre et ainsi faciliter l'atteinte des cibles ambitieuses de réduction des gaz à effet de serre adoptées par le Québec;
- d'évaluer la pertinence d'établir le cadre légal et réglementaire permettant aux secteurs forestiers privé et public de contribuer au marché du carbone québécois.** Lorsque disponible, nous serons en mesure de réaliser des analyses supplémentaires afin de quantifier les crédits de carbone compensatoires générés.



Gérard Szaraz, ing.f., M.Sc., M.A.P.

Forestier en chef

Le 28 juillet 2015



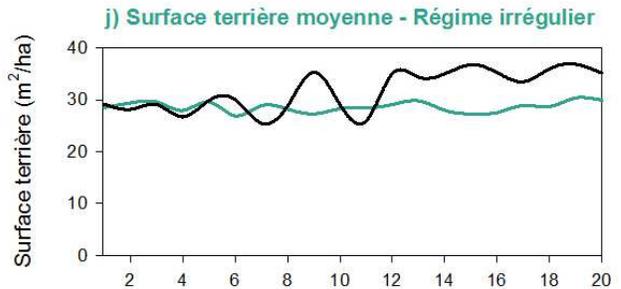
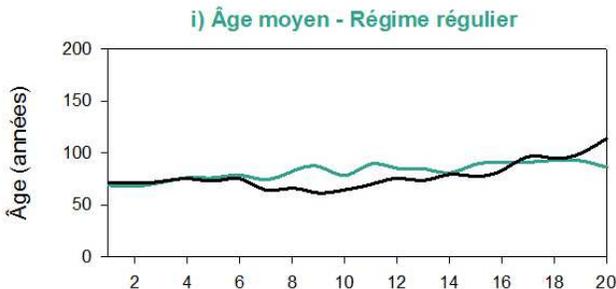
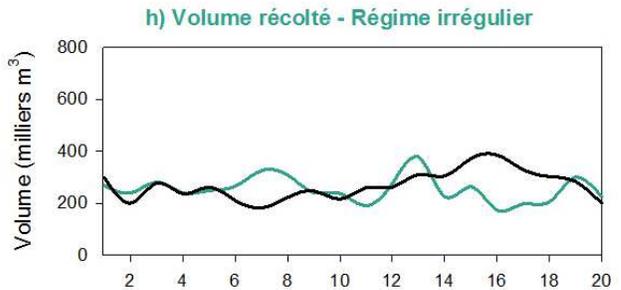
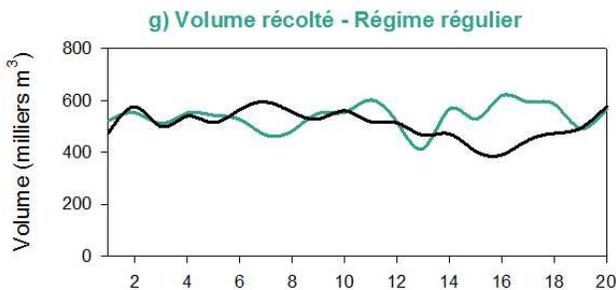
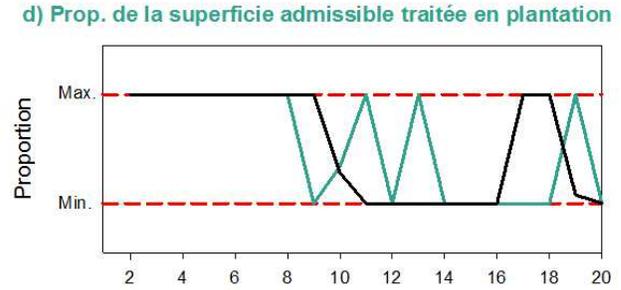
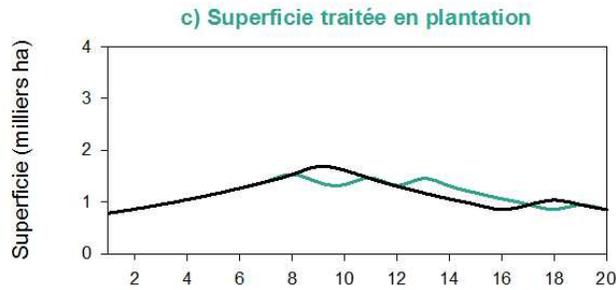
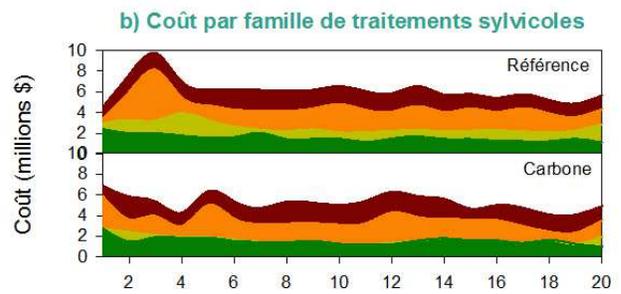
Références

- Boudewyn, P., X. Song, S. Magnussen et M.D. Gillis. 2007. Model-based, volume-to-biomass conversion for forested and vegetated land in Canada. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique. Information Report BC-X-411. Victoria, Colombie-Britannique, 124 p.
- Brown, S., O. Masera et J. Sathaye. 2000. Project-based activities. *Dans* R.T. Watson, I.R. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo et D.J. Dokken (éditeurs). Land use, land-use change, and forestry: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK.
- Garcia-Gonzalo, J., H. Peltola, E. Briceno-Elizondo et S. Kellomäki. 2007. Changed thinning regimes may increase carbon stock under climate change: A case study from Finnish boreal forest. *Climatic Change*, 81 : 431-454.
- Janssens, I.A., A. Freibauer, P. Ciais, P. Smith, G. Nabuurs, G. Folberth, B. Schla-madinger, R.W.A. Hutjes, R. Ceulemans, E.D. Schulze, R. Valentini et A.J. Dolman. 2003. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthro-pogenic CO₂ emissions. *Science*, 300 : 1538-1542.
- Kauppi, P., R.J. Sedjo, M. Apps, C. Cerri, Y. Fujimori, H. Janzen, O. Krankina, W. Makundi, G. Marland, O. Masera, G.J. Nabuurs, G.J. Razali et N.H. Ravindranath. 2001. Options for enhancing and maintenance of carbon sequestration technical and economic potential of options to enhance, maintain and manage biological carbon reservoirs and geo-engineering. *Dans* Metz et al. (éditeurs), Mitigation, IPCC third assessment report. Cambridge University press, Cambridge, pp. 302-343.
- Kurz, W.A., C.H. Shaw, C. Boisvenue, G. Stinson, J. Metsaranta, D. Leckie, A. Dyk, C. Smyth et E.T. Neilson. 2013. Carbon in Canada's boreal forest – a synthesis. *Environmental Review*, 21 : 260-292.
- Laganière, J., X. Cavard, B.W. Brassard, D. Paré, Y. Bergeron et H.Y. Chen. 2015. The influence of boreal tree species mixtures on ecosystem carbon storage and fluxes. *Forest Ecology and Management*, 354 : 119-129.
- Lemprière, T.C., W.A. Kurz, E.H. Hogg, C. Schmoll, G.J. Rampley, D. Yemshanov, D.W. McKenney, R. Gilsenan, A. Beatch, D. Blain, J.S. Bhatti et E. Krcmar. 2013. Canadian boreal forests and climate change mitigation. *Environmental Review*, 21 : 293-321.
- Lemprière, T.C., M. Johnston, A. Willcocks, B. Bogdanski, D. Bisson, M. Apps et O. Bussler. 2002. Saskatchewan forest carbon sequestration project. *The Forestry Chronicle*, 78(6) : 843-849.
- Malmshemer, R.W. P. Heffernan, S. Brink, D. Crandall, F. Deneke, C. Galik, E. Gee, J.A. Helms, N. McClure, M. Mortimer, S. Ruddell, M. Smith et J. Stewart. 2008. Forest Management Solutions for Mitigating Climate Change in the United States. *Journal of Forestry*, avril-mai : 117-171.
- Nabuurs, G.J., O. Masera, K. Andrasko, P. Benitez-Ponce, R. Boer, M. Dutschke, E. Elsiddig, J. Ford-Robertson, P. Frumhoff, T. Karjalainen, O. Krankina, W.A. Kurz, M. Matsumoto, W. Oyhantcabal, N.H. Ravindranath, M.J. Sanz Sanchez, X. Zhang. 2007. Forestry. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Neilson, E.T., D.A. Maclean, F.R. Meng, C.R. Hennigar et P.A. Arp. 2003. Optimal on- and off-site forest carbon sequestration under existing timber supply constraints in northern New Brunswick. *Journal canadien de la recherche forestière*, 38 : 2784-2796.
- Nunery, J.S. et W.S. Keeton. 2010. Forest carbon storage in the northeastern United States: Net effects of harvesting frequency, post-harvest retention, and wood products. *Forest Ecology and Management*, 259(8) : 1363-1375.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. 2010. Consultation sur l'aménagement durable des forêts du Québec : document de consultation publique – Stratégie d'aménagement durable des forêts et modalités proposées pour le futur règlement sur l'aménagement durable des forêts. Gouvernement du Québec, Québec, Qc, 104 p.
- Pan, Y., R.A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P.E. Kauppi, W.A. Kurz, O.L. Phillips, A. Shvidenko, S.L. Lewis, J.G. Canadell, P. Ciais, R.B. Jackson, S. Pacala, A.D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch et D. Hayes. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 33 : 988-993.
- Pilli, R., Grassia, G., Kurz, W.A., Smyth, C.E. et V. Blujdea. 2013. Application of the CBM-CFS3 model to estimate Italy's forest carbon budget, 1995 to 2020. *Ecological Modelling*, 266(2013) : 144-171.
- Pussinen, A., T. Karjalainen, R. Mäkipää, L. Valsta et S. Kellomäki. 2002. Forest carbon sequestration and harvests in Scots pine stand under different climate and nitrogen deposition scenarios. *Forest Ecology and Management*, 158 : 627-638.
- Sathre, R., L. Gustavsson et J. Bergh. 2010. Primary energy and greenhouse gas implications of increasing biomass production through forest fertilization. *Biomass Bioenergy*, 34(4) : 572-581.
- Schwarze, R., J.O. Niles et J. Olander. 2002. Understanding and managing leakage in forest-based greenhouse-gas-mitigation projects. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 1797 : 1685-1703.
- Smyth, C.E., G. Stinson, E. Neilson, T.C. Lemprière, M. Hafer, G.J. Rampley et W.A. Kurz. 2014. Quantifying the biophysical climate change mitigation potential of Canada's forest sector. *Biogeoscience*, 11 : 441-480.
- Ter-Mikaelian, M.T., S.J. Colombo et J. Chen. 2013. Effects of harvesting on spatial and temporal diversity of carbon stocks in a boreal forest landscape. *Ecology and Evolution*, 3(11) : 3738-3750.
- Werner, F., R. Taverna, P. Hofer, E. Thuring et E. Kaufmann. 2010. National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *Environmental Science Policy*, 13 : 72-85.



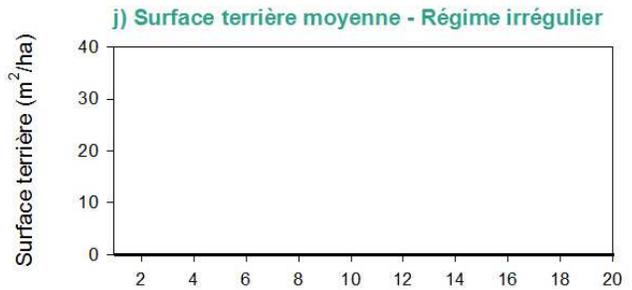
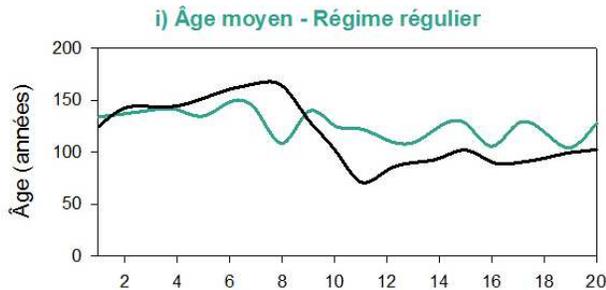
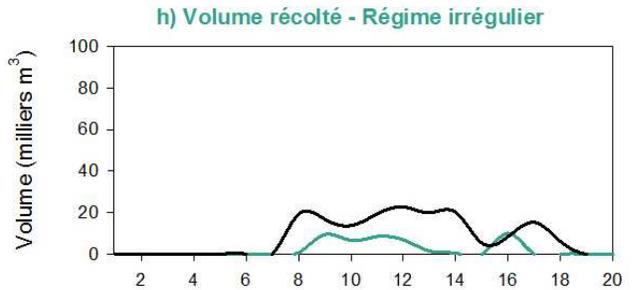
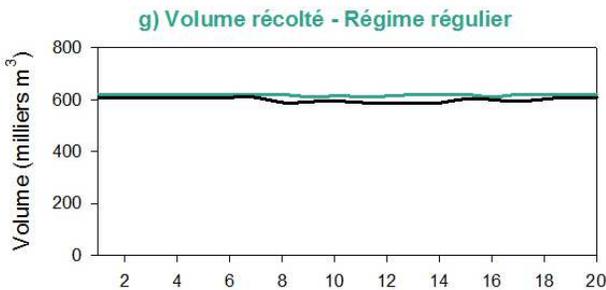
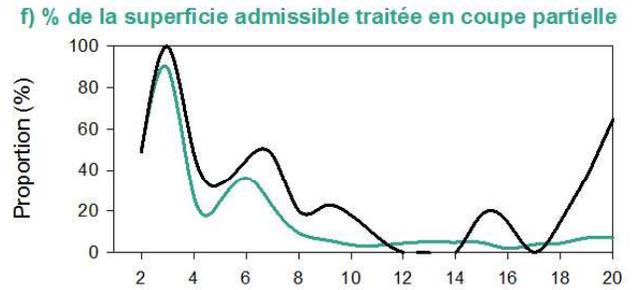
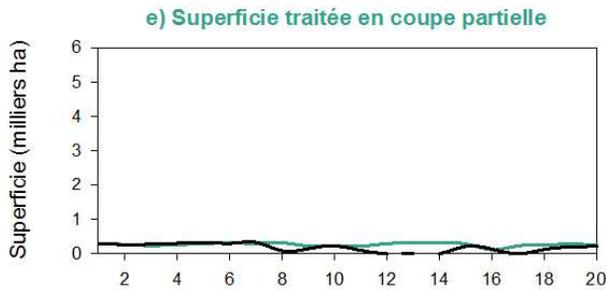
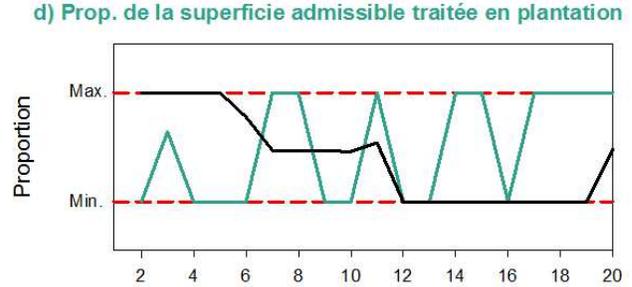
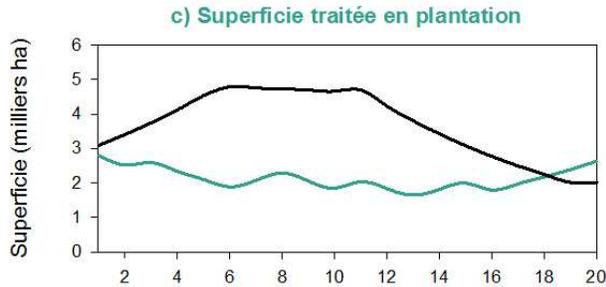
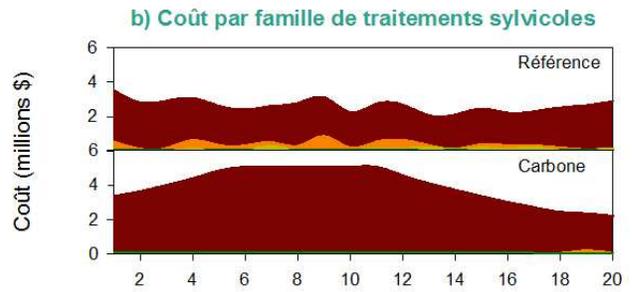
Annexes

Annexe 1. Unité d'aménagement 011-51



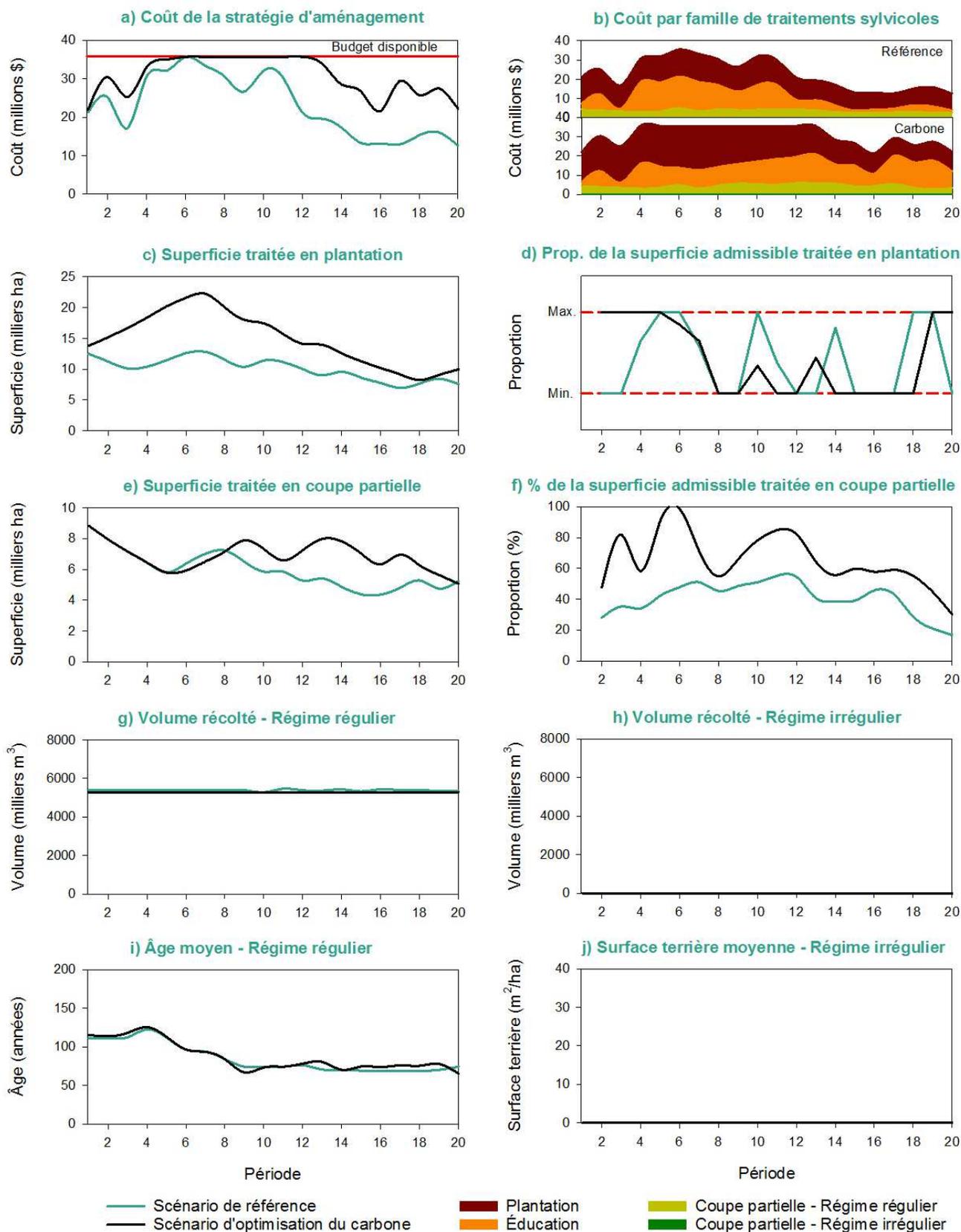
— Scénario de référence
 ■ Plantation
 ■ Coupe partielle - Régime régulier
— Scénario d'optimisation du carbone
 ■ Education
 ■ Coupe partielle - Régime irrégulier

Annexe 2. Unité d'aménagement 026-62

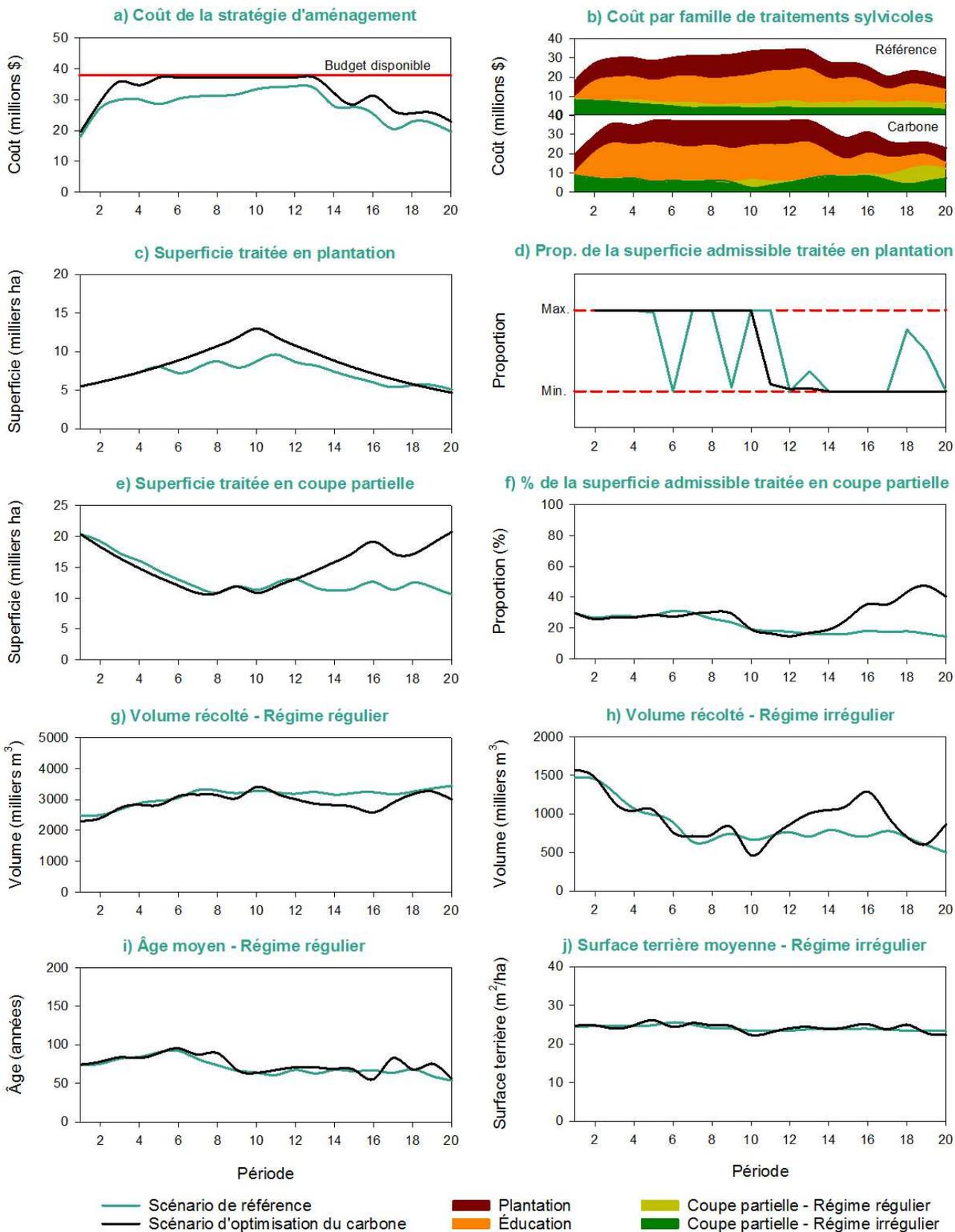


— Scénario de référence
 ■ Plantation
 ■ Coupe partielle - Régime régulier
— Scénario d'optimisation du carbone
 ■ Éducation
 ■ Coupe partielle - Régime irrégulier

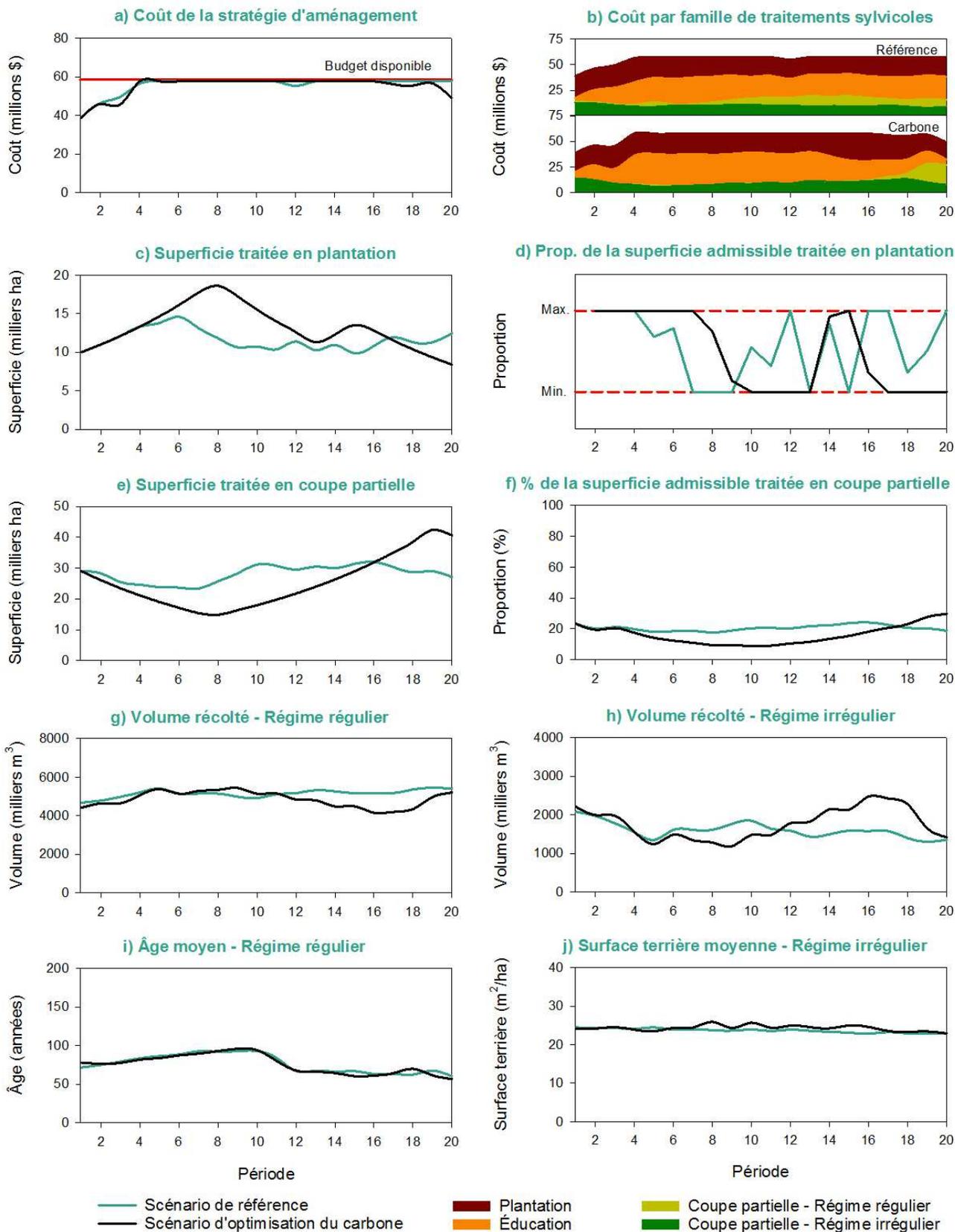
Annexe 3. Unité d'aménagement 027-51



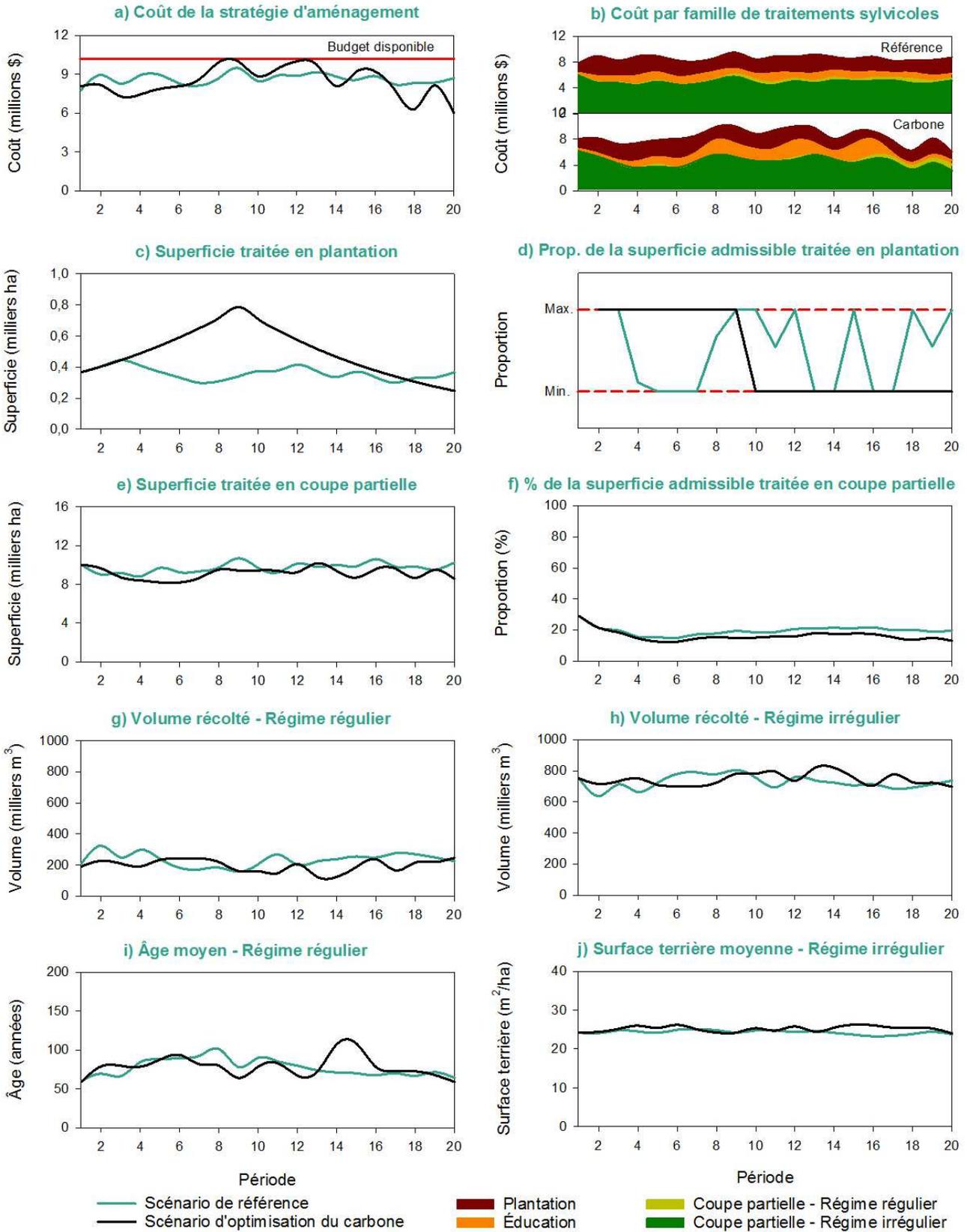
Annexe 4. Unité d'aménagement 041-51



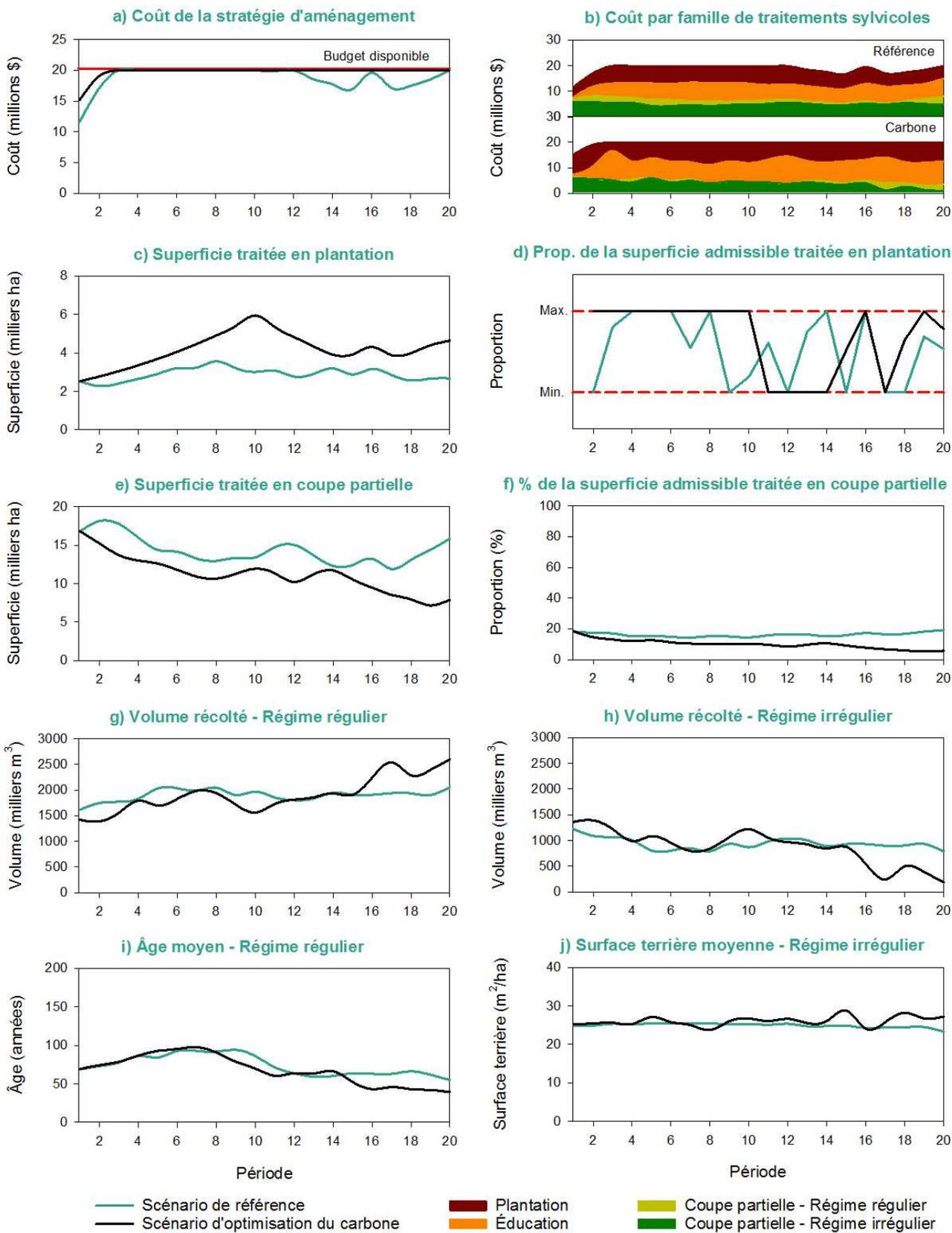
Annexe 5. Unité d'aménagement 064-51



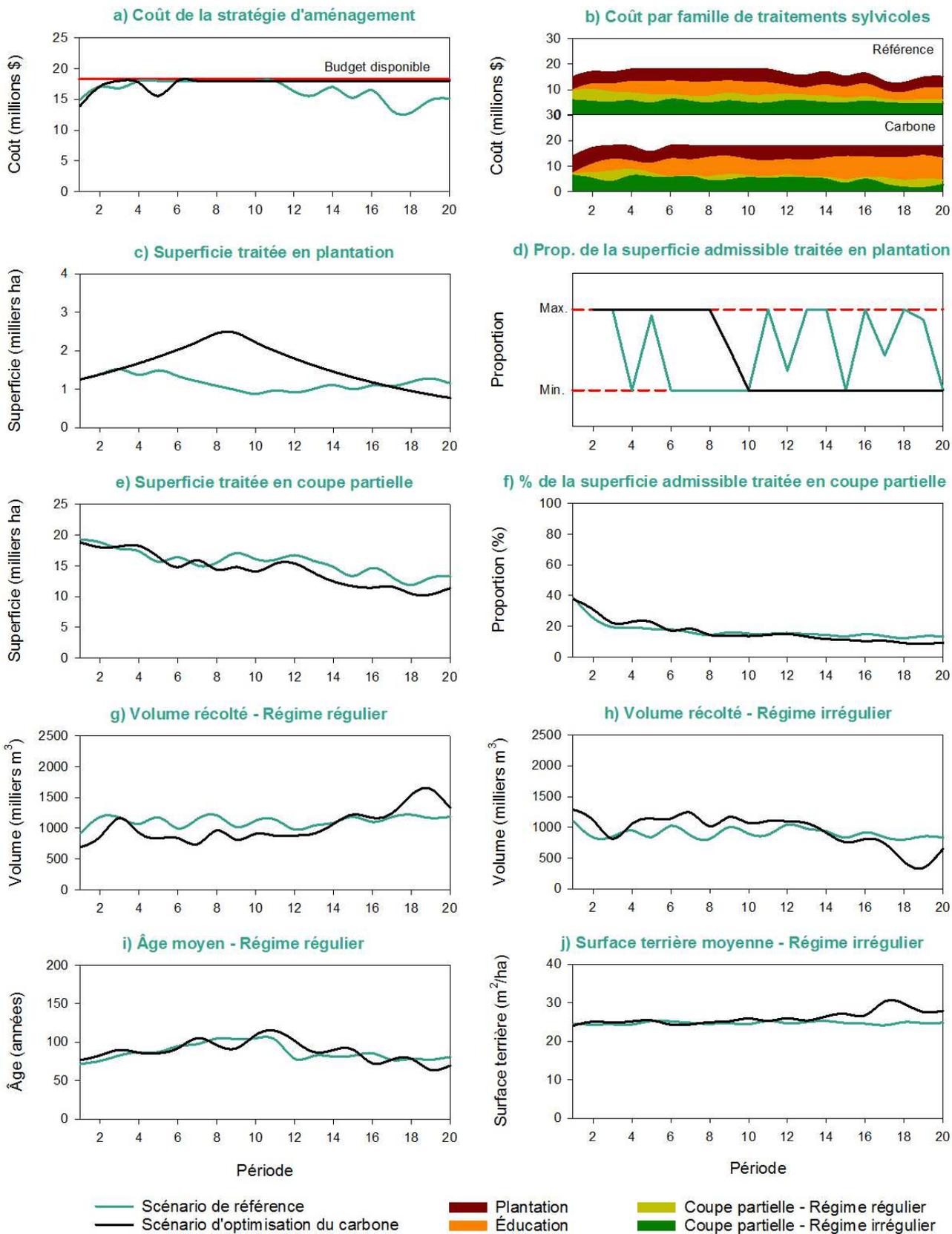
Annexe 6. Unité d'aménagement 064-52



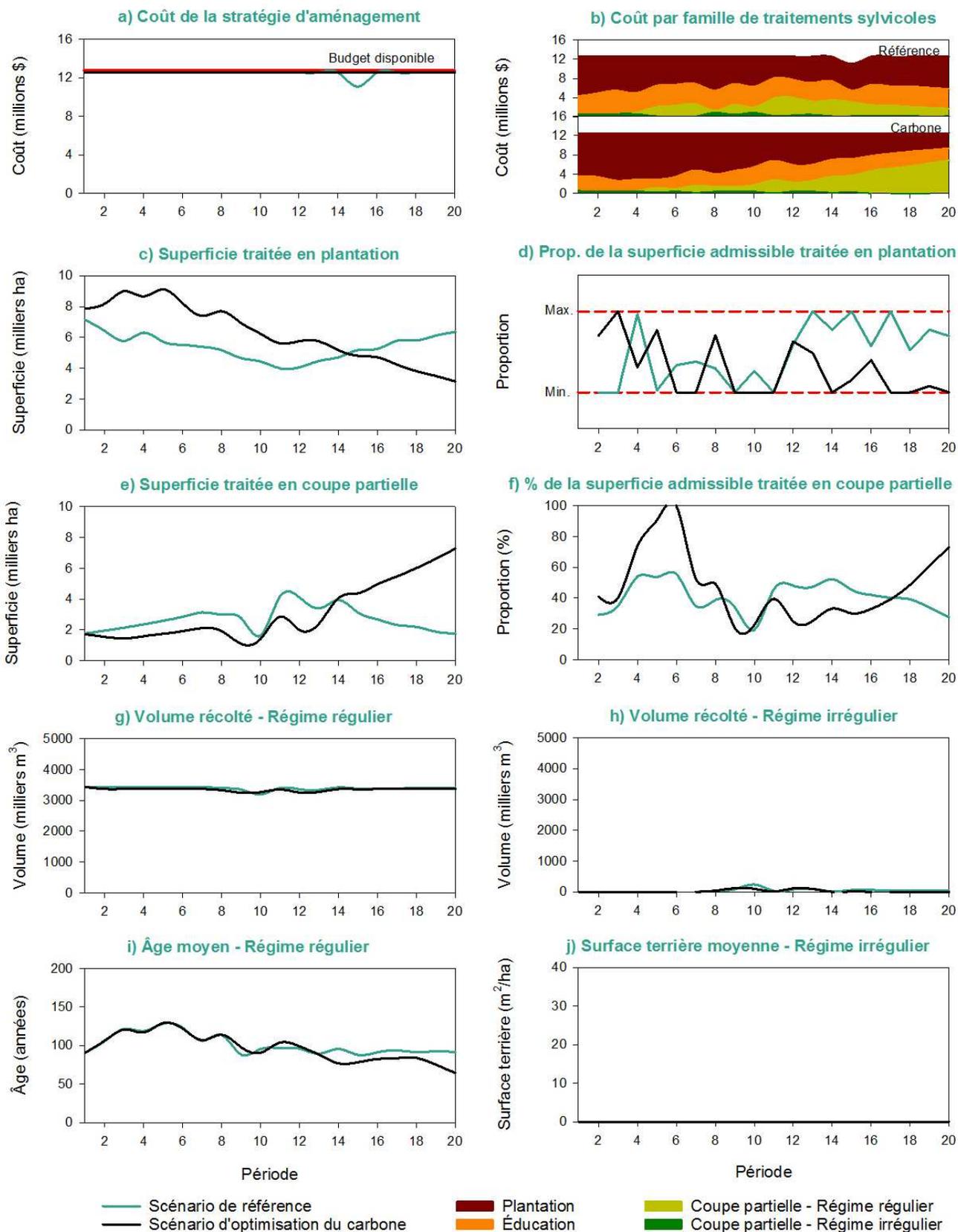
Annexe 7. Unité d'aménagement 073-51



Annexe 8. Unité d'aménagement 081-51



Annexe 9. Unité d'aménagement 085-51



Annexe 10. Unité d'aménagement 094-52

