

**Effet de la durée de révolution sur le maintien
à long terme de la fertilité des sols forestiers –
Revue de littérature**

Hors série

par

Hélène D'AVIGNON, ing.f.¹

et

Rock OUMET, ing.f., M. Sc.

Gouvernement du Québec
Ministère des Ressources naturelles
et de la Faune
Direction de la recherche forestière
2008

On peut citer tout ou partie de ce texte en indiquant la référence
© Gouvernement du Québec

¹ Rédactrice professionnelle, 546, rue de la Tourelle, Québec (Québec) G1R 1E3

Remerciements

Nous tenons à remercier monsieur Michel Campagna de la Direction de l'environnement et de la protection des forêts du ministère des Ressources naturelles et de la Faune qui nous a encouragé à approfondir ce sujet d'étude, ainsi que cette même direction du Ministère pour avoir fourni le soutien financier à sa réalisation.

Résumé

Les études menées sur les effets des périodes de révolution sur la fertilité à long terme des sols forestiers tendent à confirmer l'effet « appauvrissant » de les raccourcir dans le cas des écosystèmes forestiers boréaux, car elles correspondent souvent au moment où les concentrations d'éléments dans les arbres sont à leur maximum. Pour cette raison, certains auteurs recommandent l'adoption de la révolution dite écologique. D'autres auteurs envisagent le maintien de la fertilité à long terme des sols au regard des autres choix d'aménagement qui l'influencent aussi : régénération, nature des essences en production prioritaire, mode de récolte et traitements sylvicoles tels que les éclaircies et la fertilisation. Cette dernière se révèle une pratique de plus en plus courante en Scandinavie. En tout état de cause, ces choix doivent être considérés en fonction de la fertilité intrinsèque du sol; à cet égard, les aménagistes ont intérêt à intégrer les connaissances la concernant dans leur plan d'aménagement durable.

Table des matières

	page
Remerciements	iii
Résumé	v
Introduction	1
Chapitre premier – La dynamique de la fertilité	3
1.1 Le cycle géochimique	3
1.2 Le cycle biogéochimique	4
1.3 Le cycle biochimique	5
Chapitre deux – Effets de la période de révolution sur la fertilité	7
2.1 Effet de raccourcir la révolution	7
2.2 Effet d'allonger la révolution	10
2.3 L'équilibre géochimique – cas du Québec	12
Chapitre trois – Autres effets sur la fertilité	15
3.1 Effet du matériel parental ou fertilité intrinsèque de la station	15
3.2 Rôle des perturbations naturelles	16
3.3 Effet du mode de récolte	16
3.4 Effet de la durée du délai de régénération	17
3.5 Effet des essences	17
3.5.1 Effet des essences de fin de succession	17
3.5.2 Effet des essences de succession secondaire	18

	page
3.6 Effet de la sylviculture	19
3.7 Effet de la fertilisation	20
3.7.1 Effet fertilisant des cendres de bois	20
3.7.2 Azote, cendres, chaux : effets sur quelques paramètres de l'environnement forestier	23
Conclusion	25
Références bibliographiques	27

Liste des figures

	page
Figure 1. Les trois grands cycles des éléments nutritifs qui conditionnent la fertilité des sols dans les écosystèmes forestiers : le cycle géochimique qui englobe les entrées et les sorties d'éléments, le cycle biogéochimique qui englobe les échanges entre la végétation et le sol, et le cycle biochimique qui englobe les échanges à l'intérieur des arbres	4
Figure 2. Principe de la rotation écologique	11
Figure 3. Carte du Québec montrant les régions où le bilan géochimique est négatif à long terme à l'échelle du district écologique	13
Figure 4. Carte du Québec montrant les régions où le bilan géochimique est positif à long terme à l'échelle du district écologique	14
Figure 5. Quelques indicateurs physico-chimiques de fertilité des sols forestiers	22

Introduction

Les périodes de révolution des peuplements forestiers sont bien souvent déterminées en fonction de critères d'économie et de productivité de matière ligneuse à plus ou moins court terme (HARDIE *et al.* 1984, NEWMAN 1988, CURTIS 1995, HYYTIÄINEN et TAHVONEN 2002). Dans un tel cadre d'aménagement, raccourcir la durée de révolution des peuplements, par exemple, se trouve justifié. Cependant, le nouveau cadre d'aménagement basé sur la préservation du caractère durable des forêts oblige à satisfaire les impératifs qui lui sont liés, comme celui de maintenir à long terme la fertilité des sols, l'un des facteurs clé de la productivité des peuplements. Dans ce nouveau mode d'aménagement, la productivité des peuplements – et conséquemment leur rentabilité – se trouve déterminée en fonction de tous les facteurs qui l'influencent, y compris la période de révolution.

Un des facteurs déterminants sur la productivité des stations qui a été beaucoup étudié est la récolte par arbre entier. Dans leur ensemble, les études ont montré qu'il s'agit d'un mode de récolte qui contribue substantiellement à l'exportation d'éléments nutritifs, donc à la perte de fertilité. Par ailleurs, les effets possibles du choix de telle ou telle durée de révolution sur la fertilité restent encore peu documentés, du moins en ce qui concerne l'aménagement pratiqué dans les milieux forestiers nordiques. En effet, parmi la centaine de publications passées en revue pour la réalisation de cette synthèse, beaucoup portaient sur les effets des plantations à croissance rapide (révolution dite courte) sur la fertilité des stations situées en milieu tempéré. De leur côté, les pays scandinaves ont étudié plus profondément les propriétés fertilisantes des cendres pour palier les pertes de fertilité des sols forestiers boréaux engendrées par des pratiques d'aménagement non durable.

C'est pourquoi l'objectif de cette synthèse est de présenter les études qui portent non seulement sur les effets des périodes de révolution sur la fertilité des sols à long terme, mais aussi sur les autres facteurs qui l'influencent : biotiques (caractéristiques des peuplements), non biotiques (propriétés de la station) et d'aménagement (pratiques). Même si un certain nombre d'études proviennent de la Scandinavie, ce portrait global donne au lecteur un cadre plus élaboré dans lequel il pourra inscrire ses réflexions sur l'influence des périodes de révolution sur la fertilité des sols, facteur clé de la productivité des forêts.

Cette synthèse en est une de vulgarisation scientifique. Elle vise à joindre le plus grand nombre de forestiers intéressés par la question de l'aménagement forestier durable.

La section suivante est un rappel des quelques notions essentielles à la compréhension de la présente synthèse; les lecteurs plus familiers avec ces notions peuvent passer directement au chapitre 2.

Chapitre premier

La dynamique de la fertilité

Dans l'écosystème forestier, le sol maintient sa fertilité par l'équilibre qui se crée entre les trois grands cycles de transferts des éléments nutritifs qui y ont lieu (Ordre des ingénieurs forestiers du Québec 1996, Figure 1) :

- cycle géochimique
- cycle biogéochimique
- cycle biochimique

1.1 Le cycle géochimique

Le cycle géochimique fait référence aux apports d'éléments nutritifs qui arrivent de l'extérieur de l'écosystème (entrées) et aux pertes (sorties) qu'il subit. Les « entrées » viennent de l'atmosphère (surtout l'azote [N] et le soufre [S]), du résultat de la fixation biologique de N_2 et de l'altération des minéraux du sol (surtout phosphore [P], potassium [K], calcium [Ca] et magnésium [Mg]). Les apports de l'atmosphère comprennent aussi des composés acidifiants qui ont pour effet, par réaction avec les minéraux du sol, de contribuer au lessivage de ces derniers, c'est-à-dire à leur sortie de l'écosystème. En plus du lessivage, ces « sorties » d'éléments résultent de l'érosion, de la volatilisation ammoniacale de N et de la dénitrification.

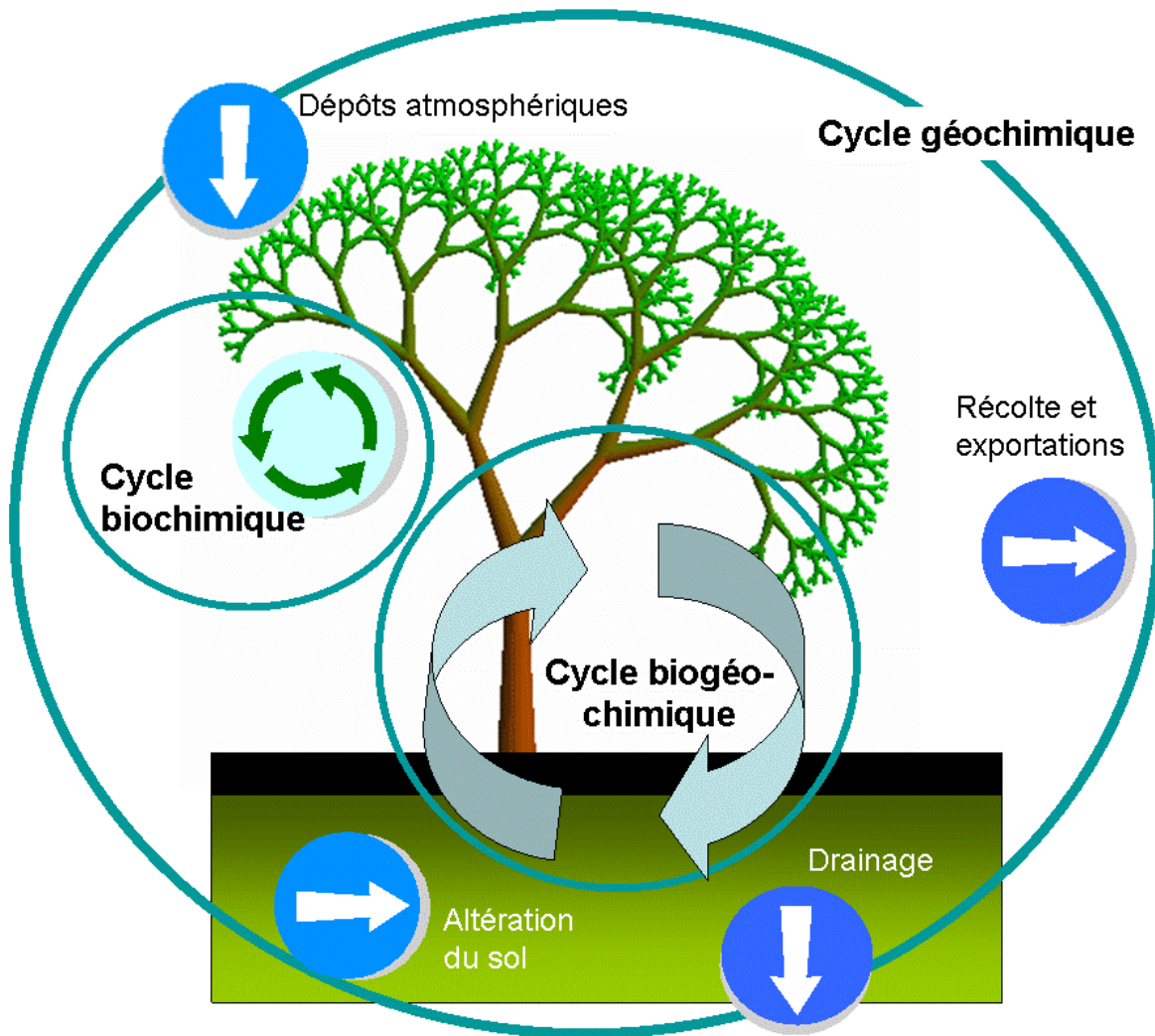


Figure 1. Les trois grands cycles des éléments nutritifs qui conditionnent la fertilité des sols dans les écosystèmes forestiers : le cycle géochimique qui englobe les entrées et les sorties d'éléments, le cycle biogéochimique qui englobe les échanges entre la végétation et le sol, et le cycle biochimique qui englobe les échanges à l'intérieur des arbres.

1.2 Le cycle biogéochimique

Le cycle biogéochimique est celui qui se produit à l'intérieur de l'écosystème, entre les arbres et le sol. Le cycle saisonnier s'effectue en quatre étapes. Dans la première, les racines des arbres prélèvent les éléments minéraux du sol. À la deuxième étape, les arbres stockent provisoirement les éléments dans leurs feuilles, bourgeons, fruits, radicules et écorce externe. La troisième étape correspond à la fin de la saison de croissance où la plus grande partie des éléments nutritifs est retournée au sol sous forme de litière, alors que l'autre partie se trouve conservée (ou immobilisée) dans les arbres. La quatrième étape

du cycle se passe au sol. En se nourrissant de la litière, la microflore (bactéries et champignons) et la microfaune rendent les éléments nutritifs dans la forme assimilable pour les végétaux, c'est-à-dire minérale (anions ou cations). La fertilité d'une station est donc intimement liée à ce recyclage (appelé minéralisation) des éléments; et plus il est rapide, meilleure est la fertilité du sol. Par ailleurs, le taux de prélèvement varie tout au cours de la vie du peuplement. Dans sa phase juvénile, le taux de prélèvement des minéraux va en augmentant. Dans la phase de maturité qui débute avec la fermeture du couvert, le taux de prélèvement ralentit pour devenir constant jusqu'à la phase de la sénescence du peuplement; les vieux arbres ne prélèvent presque plus d'éléments du sol ni ne lui en restituent guère.

1.3 Le cycle biochimique

Ce cycle concerne les échanges d'éléments qui se passent à l'intérieur même de l'arbre. Chaque nouvelle saison de croissance ramène chez l'arbre le jeu de translocation de certains éléments, de ses parties matures ou sénescentes vers ses parties en croissance. Il y a toujours plus de N, de P et de K dans les feuilles en développement que dans les feuilles matures. Mais une fois l'expansion des feuilles au terme de leur développement, les concentrations de ces éléments diminuent, puis se stabilisent avant de décliner à l'automne par le jeu de translocation inverse vers les parties pérennes (tronc, branches, racines) des arbres. Par ailleurs, le caractère peu mobile du Ca et du Mg fait que leur concentration dans les tissus augmente graduellement tout au long de la saison de croissance.

Chapitre deux

Effet de la période de révolution sur la fertilité

Un des facteurs influençant la fertilité des sols et qui a été peu étudié est la période de révolution des peuplements forestiers, qui de nos jours est le plus souvent basée sur l'âge d'exploitabilité absolue (âge des peuplements où l'accroissement annuel courant atteint l'accroissement annuel moyen). Le temps que mettent les forêts nordiques à croître pourrait expliquer cette lacune de connaissance, en partie du moins. Néanmoins, les études existantes révèlent la présence de déséquilibre dans les cycles de nutrition des peuplements quand on s'éloigne de la révolution naturelle à l'intérieur de laquelle l'équilibre du cycle nutritionnel est maintenu.

C'est une conclusion générale à laquelle de nombreux auteurs adhèrent : « Au cours d'une rotation, l'équilibre doit se maintenir entre ce que l'écosystème perd en éléments et ce qu'il gagne » (KIMMINS 1994, RANGER et TURPAULT 1999). Les études menées sur l'âge d'exploitabilité d'un peuplement au regard du maintien de l'équilibre nutritionnel d'une station porte surtout sur le fait d'avoir devancé cet âge. Ainsi a-t-on plus souvent étudié l'effet des rotations dites courtes par rapport à l'âge d'exploitabilité habituel que les rotations dites longues, c'est-à-dire plus longues que l'âge d'exploitabilité. Ces dernières ont aussi été étudiées, mais surtout par la modélisation.

2.1 Effet de raccourcir la révolution

Dans l'étude de PARÉ *et al.* (2002) effectuée au Québec dans le domaine de la sapinière à bouleau blanc, la récolte du bouleau blanc, du tremble, du sapin baumier, de l'épinette noire et du pin gris (en peuplements mélangés ou purs), à leur âge d'exploitabilité absolue respectif, a correspondu au moment

où les contenus en éléments nutritifs des arbres étaient presque à leur maximum. Ils ont toutefois assumé que les teneurs en éléments nutritifs demeuraient constantes dans les diverses parties des arbres (tronc, écorce, branches, feuillage) pour toute la durée de la croissance des peuplements et pour des sols de fertilité différente. De leur côté, KOPRA et FYLES (2005) ont récolté dans le nord de l'Ontario des plantations d'épinettes noires de 38 ans établies sur un sol de texture limono-sableuse. La quantité d'éléments nutritifs (N, P, K, Ca, Mg) mesurés dans les arbres s'est révélée moins élevée que dans le cas d'autres études comparables; ils ont attribué cette différence au jeune âge du peuplement. Il s'agissait d'une rotation relativement courte par rapport à la rotation déterminée pour les pessières naturelles, mais cet âge se rapproche d'assez près de l'âge de rotation de cette essence en plantation qui a été déterminé pour l'est du Canada et le nord des États-Unis. Les chercheurs ont estimé, dans le cas d'une rotation de 38 ans, qu'entre 125 ans (dans le cas du K) et 275 ans (dans le cas du Ca) seraient nécessaires pour que la station renouvelle son stock d'éléments perdus par l'exportation. Dans cette étude toutefois, les entrées d'éléments apportés par l'altération n'ont pas été considérées.

En France, RANGER *et al.* (2002) ont calculé le bilan nutritif complet des cations basiques (c'est-à-dire entrées [apports atmosphériques, altération du sol] — sorties [pertes par lessivage du sol, immobilisation dans les troncs]) dans des plantations de sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.]), une essence privilégiée en raison de sa grande productivité. Avec la rotation actuelle de 70 ans et la récolte par arbre entier, le bilan de cations basiques et d'azote s'est révélé négatif, et ce, dès le terme de la première rotation. Le gros de l'immobilisation s'est surtout passé avant 40 ans. L'estimation du temps requis pour renflouer les pertes de cations basiques indique qu'il faudrait envisager une rotation de 100 ans au lieu de 70, ce qui apparaît irréaliste économiquement. Cependant, les auteurs ignorent combien de rotations de 70 ans il faudrait pour réduire la fertilité du sol au point de modifier la productivité du sapin Douglas.

MORRIS *et al.* (1997) se sont demandés s'il valait mieux faire deux rotations de plantations de sapin Douglas de 40 ans au lieu d'une de 80 par rapport aux effets antagonistes combinés du rendement et du maintien de la fertilité des sols. En utilisant le cycle de la matière organique comme indicateur de fertilité du sol, leurs travaux de modélisation ont montré qu'il valait mieux faire une rotation de 80 ans plutôt que deux de 40 ans. Dans le cas de la deuxième rotation de 40 ans, la demande en N est devenue plus forte que ce qu'il y avait de disponible. Ils ont estimé que l'activité de décomposition de la matière organique n'avait pas suffi à suppléer, à la deuxième rotation, les besoins en N des jeunes plants en croissance. Les données qui ont servi aux simulations viennent de peuplements situés sur l'Île de Vancouver en Colombie-Britannique.

Selon GRESHAM (2002), le meilleur indicateur du caractère durable d'une station est la préservation de son capital d'éléments nutritifs. Il a testé son hypothèse en utilisant le contenu en N et en P dans la

biomasse produite comme indicateur de préservation. Il a évalué l'effet de deux rotations courtes consécutives du pin loblolly (*Pinus taeda* L.) planté en Caroline du Sud, sur la biomasse produite et les réserves de N et de P contenues dans le sol minéral, l'humus et la végétation de sous-bois. Dix ans après l'établissement de la deuxième rotation, les échantillons analysés ont révélé les contenus suivants par rapport aux contenus analysés au même moment dans la première rotation :

- dans le sol minéral, N et P : même contenu ou légèrement plus élevé;
- dans la couverture morte, N et P : même contenu ou légèrement moins élevé;
- dans les arbres, N et P : même contenu ou légèrement plus élevé;
- dans le sous-bois : beaucoup plus de biomasse produite, de 6 à 32 fois plus qu'à la première rotation;
- dans les arbres : légèrement moins de biomasse produite.

Devant le fait qu'à la deuxième rotation la biomasse globale a accumulé plus rapidement le N et le P, les durées de rotation déterminées sont considérées adéquates par rapport à la durabilité de ces stations. Gresham en a conclu que N et P constitueraient des indicateurs valables de préservation.

Une autre étude sur les effets des rotations courtes de plantations de pin loblolly livre des résultats différents. RUBILAR *et al.* (2005) ont étudié l'effet de deux rotations courtes de ces plantations situées en Alabama (É.-U.) sur la biomasse produite et son contenu en éléments nutritifs. À la deuxième rotation, la biomasse n'avait pas diminué, mais le contenu en éléments, oui. Il y avait moins de N et de P dans le feuillage des arbres et moins de cations basiques dans les branches et l'écorce, la conséquence, selon eux, de la disponibilité réduite de ces éléments dans le sol. L'indice de qualité de station donné par la relation âge-hauteur différait également. À la première rotation, il était à 25 ans de 23,8 m et de 22,1 m à la deuxième rotation.

PRISLEY et MALMQUIST (2002) ont évalué l'effet de raccourcir la révolution sur le rapport taux annuel du bois en croissance/bois récolté dans le cas d'aménagement intensif (plantations). L'usage de ce taux a été adopté comme indicateur du caractère durable de l'aménagement des ressources forestières par les Européens lors la mise en place du processus d'Helsinki (critère 3.1 : « Équilibre entre la croissance et la récolte de la matière ligneuse sur 10 ans »). Dans tous les scénarios où les chercheurs ont simulé diverses durées de révolution, il y avait toujours une période au cours de laquelle le rapport bois en croissance/bois récolté était inférieur à 1. La baisse de ce rapport sous 1 n'était cependant que temporaire et sa durée variait suivant le changement d'âge de révolution et le délai entre cette dernière et l'augmentation de la production. Ainsi en serait-il d'un désastre naturel, ont avancé les auteurs, pour conclure que cet indicateur seul ne pouvait suffire à juger du caractère durable de cet aménagement

intensif. Il s'agissait d'une modélisation de données d'inventaire collectées dans des plantations de pins loblolly de la Caroline du Sud (É.-U.).

Certaines études montrent que raccourcir la rotation d'un peuplement a pour effet de court-circuiter le cycle biochimique et le cycle géochimique de l'écosystème. Dans le cas des rotations courtes, les arbres se trouvent souvent récoltés au moment où ils immobilisent le plus d'éléments minéraux par rapport à leur biomasse. De plus, en raccourcissant la rotation, on rapproche du coup les exportations qui deviennent plus importantes par rapport aux importations (ou entrées) dans l'écosystème. La modification de ces deux cycles, traduite dans la diminution d'éléments nutritifs disponibles, peut être la cause de perte de productivité dans les rotations subséquentes. RUBIO et ESCUDERO (2003) affirment qu'il est essentiel que la fertilité du sol se rétablisse avant que l'on récolte de nouveau.

2.2 Effet d'allonger la révolution

RUBIO et ESCUDERO (2003) ont voulu savoir pourquoi la récolte de peuplements de châtaigniers (*Castanea sativa* Mill.) sur plusieurs rotations n'avait jamais entamé le capital du sol en éléments nutritifs. L'âge d'exploitabilité financière de ces peuplements dans la région étudiée en Espagne est établi à 20 ans, soit au moment où l'accroissement annuel courant (l'AAC) est maximal. Ils ont étudié les sols d'une série de stations correspondant à une chronoséquence de peuplements de 4 à 40 ans. Dans ceux de 4 ans, les sols avaient des taux plus faibles de matière organique, de K et de N que les peuplements plus âgés. Ils ont estimé qu'une période de 30 à 40 ans était nécessaire pour que les sols se réapprovisionnent en ces éléments, ce qui correspond à l'âge de rotation déterminé historiquement par les aménagistes locaux, soit 40 ans. Vraisemblablement, les aménagistes du passé avaient sans doute observé que raccourcir l'âge de rotation réduisait la qualité et la vigueur du peuplement de retour.

Au regard du maintien de la fertilité des stations, l'âge de rotation optimum des forêts de pin lodgepole (*Pinus contorta* Dougl.) de la Colombie-Britannique serait de 80 ans selon les estimations de WEI *et al.* (2003). À partir du modèle FORECAST, ils ont aussi estimé que reporter l'âge de rotation de 40 à 120 ans améliorerait la fertilité en N du sol, surtout celle de la couverture morte. Ces mêmes auteurs (WEI *et al.* 2000) ont aussi simulé l'effet possible du choix de l'âge de rotation sur le maintien global de la productivité de ces forêts de pins. Les simulations montrent qu'en général un âge de rotation de 120 ans assurerait le maintien de la fertilité du sol et la productivité, contrairement à un âge de rotation plus court (60 ans).

Dans l'étude de RANGER *et al.* (2002) décrite à la section précédente, les auteurs ont estimé qu'augmenter le temps de révolution contribuerait à rétablir l'équilibre géochimique entre les entrées

d'éléments (apports atmosphériques, altération du sol) et les sorties (pertes par lessivage du sol, récolte des arbres). RANGER et TURPAULT (1999) rapportent que plusieurs études ont montré que durant la croissance d'une forêt, le taux d'immobilisation des éléments nutritifs dans la biomasse diminuait avec le temps (courbe n° 1, Figure 2), tandis que les apports de minéraux venus de l'atmosphère et de l'altération du sol demeuraient plus ou moins constants (courbe n° 2). À l'intersection des deux courbes, les exportations (sorties) attribuables à la récolte équivalent les apports (entrées). L'âge d'exploitabilité pourrait être l'âge donné par la valeur correspondant à l'intersection des deux courbes. C'est la définition même de rotation écologique que KIMMINS (1974) a été l'un des premiers à suggérer d'adopter.

Selon ces études, espacer les récoltes contribuerait au maintien de l'équilibre des trois cycles de circulation des minéraux dans les écosystèmes forestiers. La durée de rotation souhaitée correspondrait, en somme, au temps que nécessite le sol pour reconstituer ses réserves d'éléments nutritifs perdus par les exportations attribuables aux récoltes.

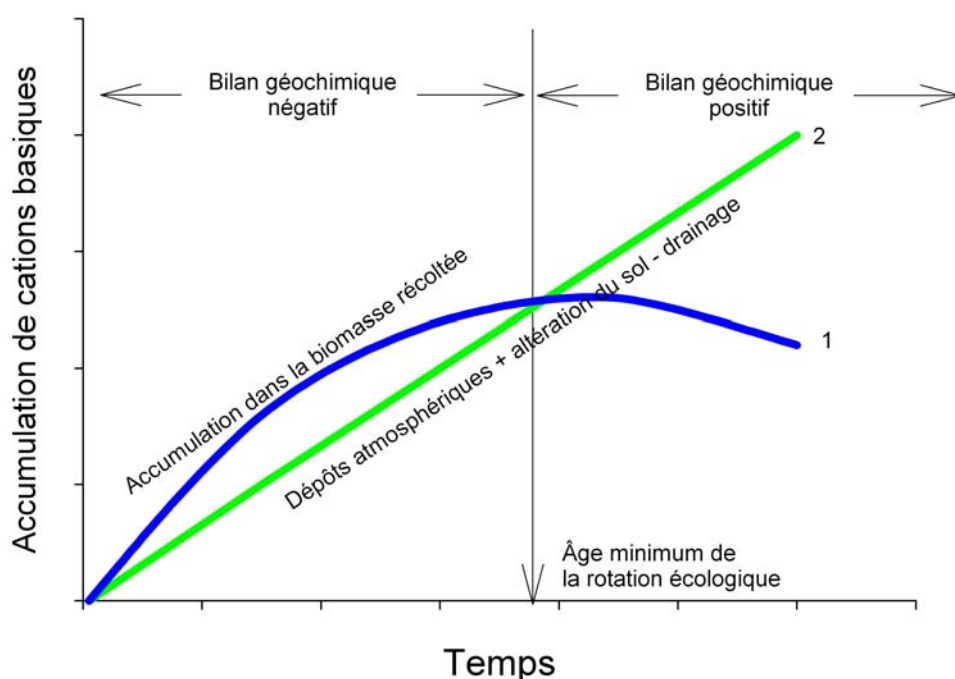


Figure 2. Principe de la rotation écologique. L'âge de rotation écologique est déterminé par le point d'intersection de la courbe de l'accumulation des éléments nutritifs par la biomasse de matière ligneuse – ici les cations basiques (courbe n° 1) – et de celle des apports cumulatifs d'éléments de l'atmosphère et du sol (courbe n° 2). Récolter avant d'atteindre cet équilibre créerait un bilan géochimique négatif en cations basiques, tandis que récolter après l'atteinte de cet équilibre entraînerait un bilan géochimique positif.

2.3 L'équilibre géochimique – cas du Québec

OUMET (2005) a établi le bilan d'alcalinité du cycle géochimique à long terme des écosystèmes forestiers au Québec à l'échelle du district écologique et à l'intérieur des six grands ensembles géologiques : les basses-terres du Saint-Laurent, les basses-terres de l'Abitibi et de la Baie de James, les Appalaches, les Laurentides et les hautes-terres de Mistassini. Il s'agissait d'évaluer les « entrées » et les « sorties » des éléments basiques (Ca, Mg, K, Na) et acides (S, N, Cl) des écosystèmes forestiers faisant partie de l'un ou l'autre des districts. Les « entrées » ou apports d'éléments considérés étaient les éléments venus de l'atmosphère et ceux libérés par l'altération du sol. Les quantités d'éléments sorties des écosystèmes comprenaient celles résultant du lessivage probable et celles résultant de l'exportation des éléments immobilisés dans les arbres récoltés (calculées selon l'accroissement annuel moyen [AAM]). Le bilan est résumé dans l'équation qui suit :

$$\text{Bilan} = \text{Entrées} \left[\begin{array}{l} \text{dépôts atmosphériques} \\ \text{altération du sol} \end{array} \right] - \text{Sorties} \left[\begin{array}{l} \text{lessivage} \\ \text{récolte} \end{array} \right]$$

Le bilan s'est révélé négatif (c'est-à-dire que les sorties d'éléments dépassent les entrées) dans le cas des Laurentides, l'Outaouais, le Témiscamingue et de la partie sud des Appalaches (Beauce et Estrie) (Figure 3). Cela signifie que les écosystèmes de ces régions reçoivent moins de cations basiques que ce qu'ils en perdent, de sorte qu'à long terme les sols s'acidifient. En d'autres termes, ces écosystèmes s'appauvrissent sur une période de temps encore indéterminée. Par rapport à la révolution dite écologique (Figure 2), – où les entrées d'éléments égalent les sorties – devancer la récolte correspond à un bilan négatif en éléments (portion gauche du graphique par rapport à l'âge de révolution écologique). À l'inverse, le bilan se révèle positif dans le cas des basses-terres du Saint-Laurent à l'est de Québec, les basses-terres de l'Abitibi et de la Baie de James, la Côte-Nord à l'est de l'île René-Levasseur et l'est des Appalaches (Figure 4). Dans ces régions, les écosystèmes accumulent plus de cations basiques que ce qu'ils en perdent. Cela signifie que la fertilité se maintient ou s'accroît. L'accumulation d'éléments dans le sol se produit si l'âge de révolution dépasse celui de la révolution écologique (portion droite du graphique de la figure 2).

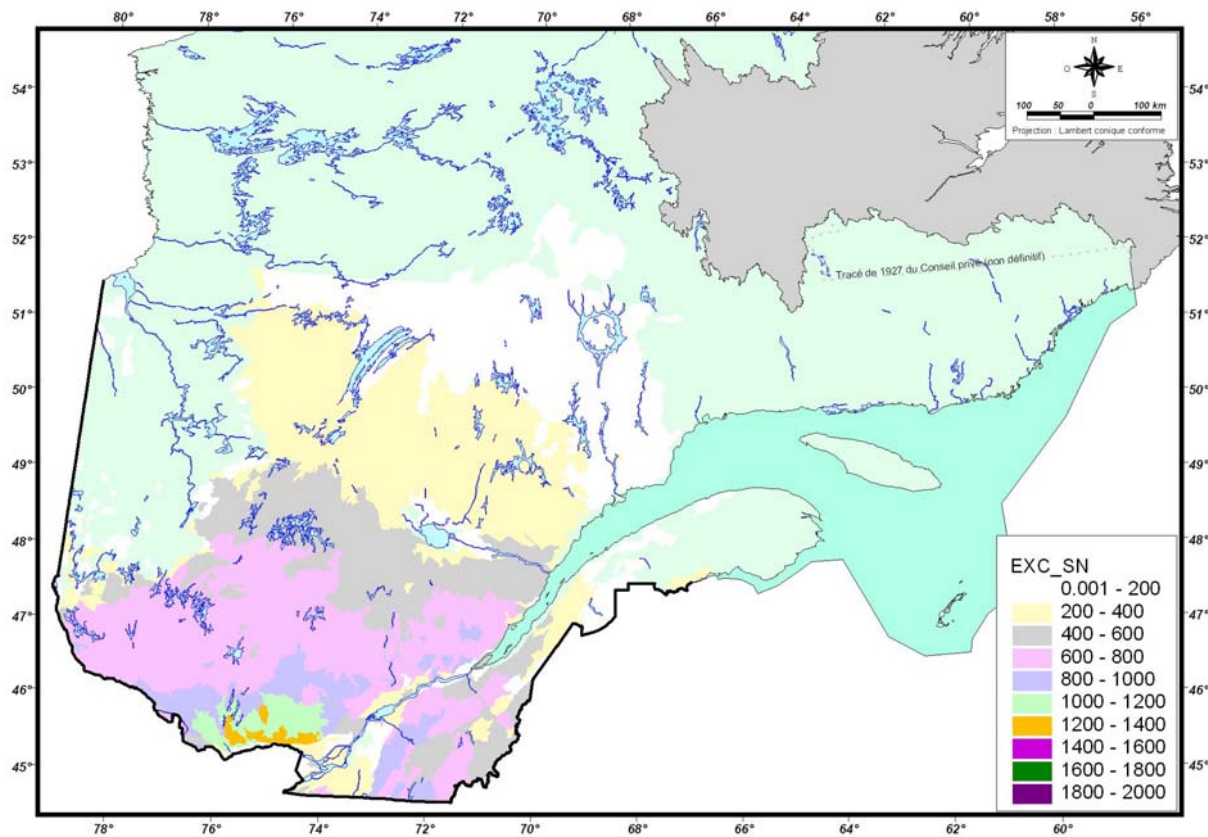


Figure 3. Carte du Québec montrant les régions où le bilan géochimique est négatif à long terme à l'échelle du district écologique (d'après OUMET 2005). Plus la valeur indiquée dans la légende est grande, plus le bilan est négatif. La zone où le bilan est le plus négatif se situe dans les Basses-Laurentides au nord-ouest de Montréal.

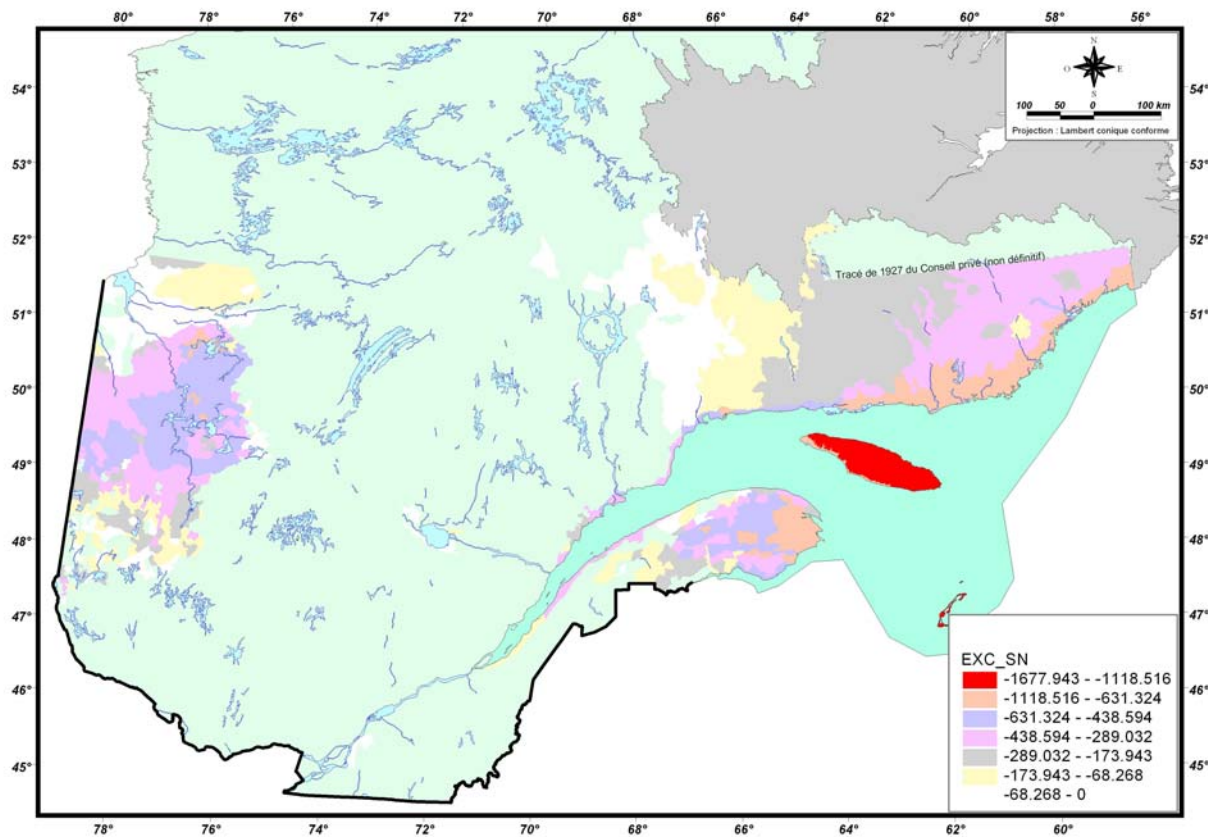


Figure 4. Carte du Québec montrant les régions où le bilan géochimique est positif à long terme à l'échelle du district écologique (d'après OUMET 2005). Plus la valeur indiquée dans la légende est grande négativement, plus le bilan, lui, est positif. La zone où le bilan est le plus positif se situe sur l'île d'Anticosti.

Chapitre trois

Autres effets sur la fertilité

La durée d'une révolution donnée n'est pas le seul facteur agissant sur la fertilité d'une station à long terme. Le mode de récolte, la nature des essences, les traitements sylvicoles – y compris la fertilisation – combinent leurs actions propres. Cependant, l'effet de l'âge de rotation sur le maintien de la fertilité des sols dépendrait avant tout de la fertilité intrinsèque de la station.

3.1 Effet du matériel parental ou fertilité intrinsèque de la station

LAMARCHE *et al.* (2004) et avant eux WEI *et al.* (2003) ont affirmé que la nature du matériel parental (ou roche mère) était le facteur le plus déterminant de la qualité des sols forestiers boréaux. Le matériel parental – le plus souvent au Québec le dépôt de surface – détermine non seulement le capital d'éléments nutritifs dans les stations, mais aussi le cyclage du N, l'activité microbienne et les caractéristiques hydrauliques du sol (disponibilité en eau).

Dans son étude sur le cycle géochimique des éléments, OUMET (2005) a aussi établi le taux d'altération chimique des sols¹, une indication de leur fertilité. Ces apports de Ca, Mg, K et de Na s'inscrivent dans le cycle géochimique des « entrées » de minéraux dans l'écosystème. Plus le taux est élevé, plus il indique que le sol est fertile. On trouve, dans l'ordre décroissant de taux d'altération, les basses-terres du Saint-Laurent ($478 \pm 256 \text{ éq ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), les Appalaches ($444 \pm 131 \text{ éq ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), les basses-terres de l'Abitibi et de la Baie-James ($636 \pm 185 \text{ éq ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), le Bouclier des Laurentides ($124 \pm 17 \text{ éq ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) et les hautes-terres de Mistassini ($132 \pm 75 \text{ éq ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, Figure 3).

¹ Le taux d'altération est mesuré en éq/ha/an

3.2 Rôle des perturbations naturelles

Les perturbations naturelles qui touchent les écosystèmes de façon récurrente (feu, chablis, épidémie, maladie) ont un effet dynamisant sur les trois grands cycles de circulation des éléments nutritifs (biochimique, biogéochimique et géochimique). Par exemple, en se dissolvant, les cendres des arbres brûlés par le feu rendent au sol les éléments minéraux (cations basiques) qui se trouvaient immobilisés dans la biomasse. Les cendres ont aussi pour effet de diminuer l'acidité du sol (SMITH 1970, GRIER 1975, RAISON 1979, KUTIEL et SHAVIV 1992). Les charbons demeurés au sol, qui ont une grande affinité pour les cations basiques, accroissent la fertilité de la litière et ce, pour de nombreuses décennies (BÉLANGER *et al.* 2004). Il y a des pertes d'azote, mais elles durent rarement plus de deux à trois ans (LIKENS *et al.* 1970, BAILEY *et al.* 1992, DAHLGREN et DRISCOLL 1994, JEWETT *et al.* 1995).

Les perturbations naturelles ne se trouvent pas à contribuer de façon importante aux sorties (aussi désignée par le terme « exportations ») d'éléments de l'écosystème, à l'inverse des activités de récolte. Toutefois, les quantités d'éléments exportées par le fait de récolter les arbres et l'effet à long terme créé sur la fertilité des sols découlent de nombreux facteurs dont le mode de récolte, le délai de régénération et les types d'essences récoltées.

3.3 Effet du mode de récolte

Récolter par arbre entier plutôt que par tronc seul a pour effet d'exporter davantage d'éléments minéraux, ce qui déséquilibre le cycle des entrées et des sorties d'éléments dans l'écosystème. Cet effet « appauvrissant » de minéraux dans les sols, attribuable au mode de récolte par arbre entier, a largement été documenté au cours des vingt dernières années. L'appauvrissement est particulièrement manifeste sur les stations pauvres. Des réductions de croissance ont été observées dès la deuxième rotation. De plus, si l'on rapproche les rotations, on accélère le rythme des exportations d'éléments. On observe aussi que la disponibilité des cations basiques dans les horizons superficiels du sol diminue avec le mode de récolte par arbre entier par rapport au mode par tronc seul et ce, parfois jusqu'à 15 à 20 ans après récolte (GOULDING et STEVENS 1988, OLSSON *et al.* 1996, THIFFAULT *et al.* 2006). Les perspectives de perte de croissance associée à l'appauvrissement du sol après la récolte par arbre entier sont fondées, malgré que certaines observations laissent penser que le mode de récolte par tronc seul cause le même effet que celui par arbre entier en forêt boréale sous aménagement (HENDRICKSON *et al.* 1989, THIFFAULT *et al.* 2007). Les éléments Ca et K sont parmi les minéraux qui risquent le plus de faire défaut à court, moyen et long terme (GOULDING et STEVENS 1988, FEDERER *et al.* 1989, DAHLGREN et DRISCOLL 1994, OLSSON *et al.* 1996, DUCHESNE et HOULE 2006, THIFFAULT *et al.* 2006).

3.4 Effet de la durée du délai de régénération

Si au terme d'une rotation le mode de récolte influence directement le bilan des entrées et des sorties d'éléments, la rapidité avec laquelle la régénération s'installe après la coupe et la nature des essences qui la compose jouent sur la disponibilité des éléments à l'intérieur de l'écosystème au cours de la rotation.

L'absorption des éléments nutritifs et la rapidité avec laquelle la régénération les accumule après coupe jouent un rôle clé en matière de minimisation des pertes d'éléments après coupe. La perturbation du sol par la récolte (scarifiage, bouleversement de la couverture morte) a réduit considérablement l'accumulation de la biomasse et des éléments nutritifs dans la régénération six ans après coupe dans une érablière au New Hampshire (Mou *et al.* 1993). S'il survient un délai avant que la régénération s'installe, ou que la régénération préétablie ait été éliminée, du lessivage important de certains éléments dans les horizons superficiels du sol se produit au cours des quelques années après la coupe (DAHLGREN et DRISCOLL 1994, BOCK et VAN 2002). L'exemple le plus spectaculaire est sans doute celui de l'expérience qui a été menée à la forêt expérimentale de Hubbard Brook, NH (bassins versants n^{os} 2 et 5 [témoin]) sur la suppression pour une durée de trois ans de toute régénération après coupe totale à l'aide de phytocide (REINERS 1992). Les pertes de N à l'exutoire des bassins au cours de ces trois années après coupe ont été de 237 kg/ha plus élevées dans le bassin où la régénération a été supprimée. La même tendance de pertes a été observée dans le cas des éléments minéraux (Mou *et al.* 1993). L'installation rapide de la régénération après perturbation joue donc un rôle crucial dans la conservation des éléments nutritifs dans l'écosystème qui autrement risqueraient d'être perdus par lessivage.

3.5 Effet des essences

3.5.1 Effet des essences de fin de succession

La disponibilité des éléments minéraux est aussi influencée par la nature même des essences établies dans une station puisque des différences existent entre leurs caractéristiques physiques (géométrie et dimension du houppier, patron d'enracinement), biologiques (nature du feuillage, composition du bois et du feuillage) et physiologiques (besoins en éléments, émission d'acides par les racines) (BRAIS *et al.* 1995, AUGUSTO *et al.* 2000a;).

Ces différences sont souvent établies par l'étude de la relation entre la biomasse produite d'une essence donnée et son contenu en éléments minéraux (appelé aussi la minéralomasse). En France, AUGUSTO *et al.* (2000b) ont établi la relation entre les biomasses aériennes et les contenus en N, P, K, Ca, Mg de

quatre essences : le sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.), l'épicéa commun (*Picea abies* [L.] Karst.), le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) et le hêtre européen (*Fagus sylvatica* L.). Dans le cas de ces quatre essences, les concentrations moyennes des parties aériennes en éléments majeurs ont diminué avec l'âge jusqu'au stade adulte où elles se sont stabilisées. Cet âge correspond approximativement à l'âge où l'accroissement courant (ACC) est maximal. Cependant, l'atteinte de l'âge adulte diffère d'une essence à l'autre. Ainsi les concentrations moyennes des éléments du sapin Douglas ont été atteintes à 30 ans; le pin sylvestre, à 40 ans; l'épicéa commun, à 50 ans et le hêtre européen, à 80 ans. De plus, pour une même biomasse de tronc, la quantité d'éléments varie suivant l'essence. Par exemple, le hêtre européen contiendrait plus de N et de K que, dans l'ordre décroissant de quantités, le sapin Douglas, l'épicéa commun et le pin sylvestre, tandis qu'il contiendrait aussi plus de Ca que, dans l'ordre décroissant, l'épicéa commun, le pin sylvestre et le sapin Douglas.

Cette relation « biomasse – minéralomasse » a été établie par FOSTER *et al.* (1995) pour le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) provenant d'un peuplement de 25 ans situé dans le nord de l'Ontario. Le contenu en minéraux de l'essence a varié non seulement en fonction de son stade de développement, mais aussi en fonction de la fertilité de la station. Les plus grandes biomasse et minéralomasse produites ont été mesurées dans les stations les plus fertiles.

De leur côté, BOUCHER et CÔTÉ (2002) ont calculé le taux d'immobilisation des cations Ca, Mg, et K de six essences feuillues de la forêt boréale tempérée : le frêne américain (*Fraxina americana* L.), l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.), l'érable rouge (*Acer rubrum* L.), le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.), le tilleul d'Amérique (*Tilia americana* L.), et le chêne rouge (*Quercus rubra* L.). Le frêne américain est l'espèce qui a montré le taux d'immobilisation de K et de Ca le plus élevé, suivi de l'érable à sucre. Le chêne rouge est l'espèce dont le taux d'immobilisation s'est révélé le plus bas. Le taux global d'immobilisation le plus élevé revient aux deux espèces de mi-succession, le frêne américain et le chêne rouge.

3.5.2 Effet des essences de succession secondaire

La disponibilité des éléments minéraux suivant le gradient de succession naturelle des essences a aussi été étudiée. BÉLANGER *et al.* (2004) ont rapporté l'étude d'ALBAN (1982) dans laquelle les essences pionnières se sont montrées plus exigeantes au plan nutritif que celles de fin de succession, exigences traduites dans le sol par l'élévation du taux d'acidification. Tout arbre en croissance a pour effet d'acidifier le sol; les racines rejettent des ions H^+ dans le sol lorsqu'elles absorbent les cations basiques Ca, Mg et K. Or, plus la croissance est rapide plus le taux d'acidification l'est aussi. Dans cette étude d'ALBAN (1982) menée dans la forêt boréale du Minnesota, l'essence à croissance rapide peuplier faux-tremble

(*Populus tremuloïdes* Michx.) a eu pour effet d'accélérer l'acidification du sol minéral comparativement aux essences résineuses de fin de succession. Cependant, comme la couverture morte sous la peupleraie avait une concentration plus élevée en cations basiques que sous celle des résineux, l'auteur en a conclu que les trembles avaient absorbé les cations basiques du sol minéral, qui vraisemblablement se seraient retrouvés dans la couverture morte à la tombée des feuilles. Par ailleurs, d'autres auteurs ont observé que la litière de feuilles produites par les essences à graines légères était riche en cations basiques, en N et peu acide (CHATARPAUL *et al.* 1985, CÔTÉ et FYLES 1994).

PARÉ et BERGERON (1996) ont aussi constaté cet enrichissement en cations basiques de la couverture morte sous des peuplements de trembles en Abitibi dans la région nordique argileuse; l'enrichissement n'a cependant pas été accompagné d'appauvrissement de cations du sol minéral. Les auteurs ont expliqué l'absence d'acidification par la forte capacité tampon du sol argileux, très riche en cations basiques. Dans le cas de l'érablière, les essences pionnières peuplier à grandes dents (*Populus grandidentata* Michx.), bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.) et bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.) auraient également enrichi la couverture morte – particulièrement en K – de façon plus importante que l'érable à sucre. Par contre, seul le Mg dans le sol minéral a diminué sous les essences pionnières (BÉLANGER *et al.* 2004). BRAIS *et al.* (1995) ont constaté l'effet positif du tremble sur les concentrations de Ca dans la litière. Les auteurs sont d'avis que l'établissement de la cohorte de feuillus de succession secondaire dans le domaine de la sapinière à bouleau blanc permettrait, par son effet fertilisant, de maintenir de rotation en rotation la fertilité des sols forestiers pour les conifères formant le peuplement du stade final de succession.

Dans la foulée des études précédentes, LÉGARÉ *et al.* (2004) ont testé l'hypothèse selon laquelle la présence du peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) dans un peuplement d'épinette noire influencerait positivement la croissance de l'épinette noire et le volume marchand total du peuplement. Pour que l'effet positif du tremble se fasse sentir sur le DHP et la hauteur des épinettes noires, il faudrait, selon les résultats, que le tremble couvre 41 % ou moins de la surface terrière du peuplement. Les feuilles de trembles, en se décomposant beaucoup plus rapidement que les aiguilles d'épinettes, augmentent la disponibilité des éléments nutritifs. Les épinettes se trouvent à bénéficier en quelque sorte des vertus fertilisantes des feuilles du tremble, riches en éléments minéraux.

3.6 Effet de la sylviculture

Au lieu de miser sur les révolutions courtes, certains aménagistes préféreront garder des révolutions plus longues et pratiquer des éclaircies. En Finlande, HYYTIÄINEN et TAHVONEN (2002) ont établi quelques scénarios financiers à cet égard. L'optimisation de la fréquence des éclaircies (qui peut varier de 1 à

6 fois) peut faire en sorte qu'il soit en effet économiquement plus rentable de prolonger les rotations de 5 à 20 ans, à condition d'augmenter le nombre d'éclaircies et leur intensité, en particulier lorsque les taux d'intérêts sont moyens (3 à 4 %) et que les stations sont pauvres. En Finlande où l'étude a été menée, 20 % du bois récolté provient des éclaircies.

Dans le cas de l'usage multiple des forêts, augmenter l'âge de rotation, s'il est combiné avec l'augmentation du nombre d'éclaircies, devient une solution pour atténuer les conflits entre différents utilisateurs sans réduire la possibilité forestière (CURTIS 1995).

3.7 Effet de la fertilisation

En Scandinavie, le recours à la fertilisation est de plus en plus envisagé pour contrer l'effet appauvrissant des rotations successives de plantations. SVERDRUP et ROSEN (1998) estiment qu'avec l'intensité de récolte actuelle, les réserves d'éléments nutritifs risquent de diminuer sérieusement partout en Suède. Ils en sont arrivés à cette conclusion après avoir mesuré le lessivage des cations (Ca, Mg et K) hors de la zone des racines et ce qu'elles absorbent (les exportations) par rapport aux importations venues de l'altération et des dépôts atmosphériques. Le taux de diminution des cations mesuré au cours des deux années qu'a duré leur étude (0,33 keq/ha/an) permettrait, de rotation en rotation, de récolter de 80 à 85 x 10⁶ m³/an dans le cas de la récolte des troncs seulement. Dans le cas de la récolte par arbre entier, le taux de diminution de cations de 0,62 keq/ha/an risquerait selon ces chercheurs de « vider » les réserves d'éléments nutritifs du sol en moins de deux rotations.

Or, en Suède seulement, les centrales d'énergie alimentées à la biomasse produisent annuellement entre 250 000 et 300 000 tonnes de cendres de bois (HÅNELL et MAGNUSSON 2005). Jusqu'à récemment, ces cendres étaient encore principalement disposées dans des sites d'enfouissement. Cependant, depuis les années 1990, on examine la possibilité de les retourner en forêt en vue de réapprovisionner les sols en éléments minéraux perdus (ERIKSSON 1998).

3.7.1 Effet fertilisant des cendres de bois

En plus d'avoir la capacité de neutraliser les acides, les cendres de bois redonnent aux sols ses minéraux perdus par l'exportation de la biomasse. Les cendres de bois ont en effet une teneur élevée en oxydes, particulièrement de Ca, Mg et K. Des études ont été menées pour savoir si leur richesse élevée en ces sels solubles et leur pH très alcalin pouvaient endommager les plantes et les micro-organismes sensibles du sol. PERKIOMAKI et FRITZE (2002) ont testé l'hypothèse selon laquelle les cendres appliquées sous forme de granules créaient moins d'effet immédiat intense – ce qui leur est nuisible – sur les micro-organismes que les cendres libres, puisque les premières mettaient plus de temps à se dissoudre dans l'humus. Ils ont mené une expérience sur les effets à long terme (18 ans) des cendres sur l'activité

microbienne (respiration basale – et taux d'incorporation de la thymidine) et sur la structure de communautés microbiennes. L'application de doses différentes de deux formes de cendres (libre ou granulée) a produit la même réaction dans l'humus de toutes les stations, indépendamment de leur fertilité initiale respective : l'activité microbienne s'est accrue et la structure des communautés s'est modifiée. Cependant, à long terme, l'effet positif des granules s'est poursuivi parce qu'ils libéraient encore des minéraux au terme des 18 ans. Les auteurs recommandent, pour cette raison, de préférer l'usage de cendres sous forme de granules plutôt que de poudre. L'épandage de granules présente de plus l'avantage d'éviter la dispersion de poussière et les problèmes de santé qui en résultent. Qui plus est, l'épandage par hélicoptère et par tracteur se trouve facilité (MAHENDRAPPA *et al.* 1994, ERIKSSON *et al.* 1998).

BRUNNER *et al.* (2004) ont montré la capacité fertilisante des cendres de bois deux ans après en avoir appliqué dans des plantations d'épinette de Norvège (*Picea abies* [L.] Karst.) en Suisse. La disponibilité du Ca et du Mg s'est accrue dans le sol et dans les racelles, alors que celle des oligoéléments Fe, Zn et Mn ainsi que de l'Al (qui est toxique) a diminué. Le pH est passé de 3,2 à 4,8, la saturation en bases de 30 à 86 %, le rapport $Mg+Ca+K/Al$ dans le sol de 1,5 à 5,5. Ces indicateurs de fertilité ont tous révélé que les sols s'étaient améliorés deux ans après l'application des cendres de bois. La figure 5 présente quelques indicateurs de richesse du sol.

SAARSALMI *et al.* (2004) ont considéré dans leur étude sur la fertilisation l'apport de l'azote dans la productivité globale des forêts boréales finlandaises. Les résultats qu'ils rapportent en introduction montrent que l'application de cendres seules ne suffit pas à accroître la productivité; il manque l'azote. Les auteurs rappellent notamment l'étude de KUKKOLA et SARAMÄKI (1983) menée en Finlande dans laquelle l'azote a été le seul élément dans les sols forestiers à avoir fait augmenter la croissance des arbres lorsqu'il a été appliqué seul. Par ailleurs, on aurait pu s'attendre à ce que l'application de cendres induise suffisamment de minéralisation des réserves considérables d'azote contenues dans l'épaisse matière organique pour se traduire dans une augmentation de croissance des arbres. Or, les expériences menées à cet effet jusqu'à tout récemment n'ont rien montré en ce sens (MALMSTRÖM 1953, SIKSTRÖM 1992, PRESCOTT et BROWN 1998, MOILANEN et ISSAKAINEN 2000, JACOBSON 2003).

Dans l'expérience de SAARSALMI *et al.* (2004) citée précédemment, quatre plantations de pin sylvestre et une d'épinette de Norvège ont été amendées : de cendres seules d'une part et de cendres combinées avec de l'azote d'autre part. Dans les deux traitements, la disponibilité du Ca et du Mg s'est accrue dans l'humus; le pH est remonté de 1 à 1,7 unités et de 0,3 à 0,4 unité dans les 5 premiers cm du sol. Cependant, dans les stations d'application des cendres seules, aucun effet positif significatif n'a été relevé sur la croissance en volume. Une légère amélioration a été notée avec l'amendement combiné de N et de cendres.

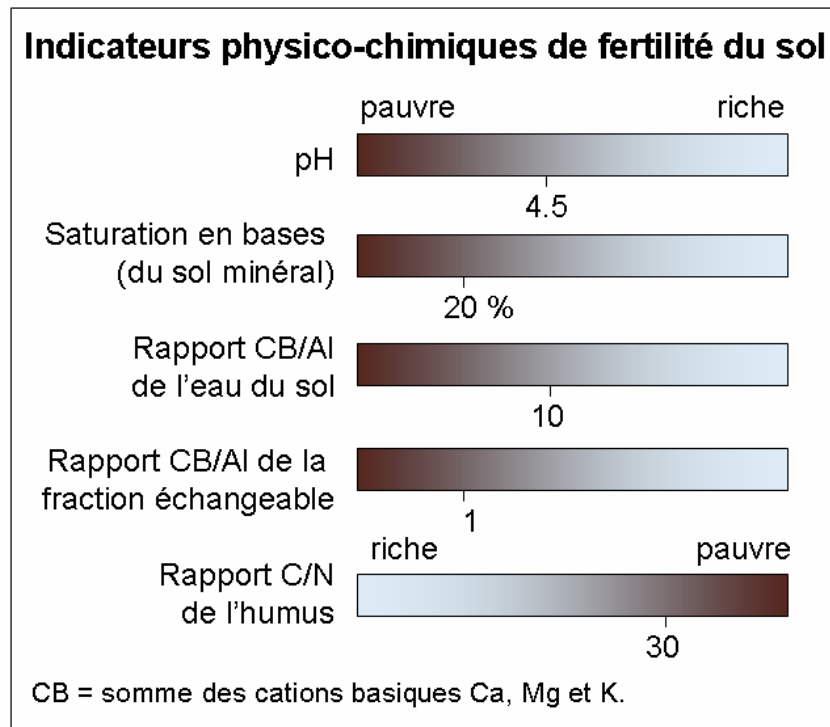


Figure 5. Quelques indicateurs physico-chimiques de fertilité des sols forestiers (d'après MEIWES *et al.* 1986, OUMET et CAMIRÉ 1995, UBA 2004).

HÄNELL et MAGNUSSON (2005) ont pour leur part évalué la pertinence de fertiliser les sols organiques de la Suède avec des cendres de bois. Il leur apparaît moins intéressant d'épandre des cendres en sol minéral, puisque c'est l'azote qui y est l'élément le plus limitatif. En revanche, l'épandage de cendres en sol organique apparaît prometteur, l'azote n'étant pas un facteur limitatif. Selon cette évaluation, les peuplements forestiers les plus aptes à réagir positivement à l'épandage de cendres de bois seraient ceux rendus à mi-rotation sur sols bien drainés et ceux rendus vers la fin de la rotation situés sur sols organiques, dont le sous-bois constitué d'arbustes ou de carex est indicateur d'une station de faible productivité.

De ce côté-ci de l'Atlantique, un essai de fertilisation avec de la cendre de bois a été effectué dans le but de contrer les effets appauvrissants de la production de biomasse sur courtes rotations. Dans l'état de New-York aux États-Unis, PARK *et al.* (2005) ont amendé le sol d'une plantation de saules (*Salix sp*) avec de la cendre de bois. Les indicateurs de fertilité mesurés (pH – disponibilité dans le sol de P, K, Ca et Mg) ont révélé des réactions positives : remontée du pH dans les 10 premiers cm du sol; augmentation de la disponibilité du P et des cations K, Ca et Mg. L'ajout de cendres par contre n'a produit aucun effet sur la

quantité de biomasse produite. À l'instar des autres chercheurs, PARK *et al.* (2005) recommandent d'ajouter de l'azote en plus des cendres si le but est aussi d'augmenter la productivité.

3.7.2 Azote, cendres, chaux : effets sur quelques paramètres de l'environnement forestier

NOHRSTEDT (2001) a passé en revue les expériences qui ont été menées en Suède sur l'impact des fertilisants azotés, des cendres et de la chaux sur quelques paramètres de l'environnement forestier :

Croissance des arbres – Il a largement été démontré que l'azote était le seul élément qui, appliqué individuellement, favorisait la croissance des forêts boréales conifériennes. L'augmentation de croissance a souvent été le résultat d'apport encore plus intensif d'azote. La chaux ou les cendres de bois ne stimule que très légèrement la croissance sur des stations dont l'humus a un rapport C/N < 30 alors que l'effet opposé se produit sur les stations ayant le rapport C/N > 30. Il semble que le Ca soit l'élément le plus limitatif à la croissance des érablières et des pessières rouges du nord-est de l'Amérique (HUNTINGTON *et al.* 1990, OUIMET et CAMIRÉ 1995, WILMOT *et al.* 1996, LAWRENCE *et al.* 1997, LONG *et al.* 1997, HAWLEY *et al.* 2006, MOORE et OUIMET 2006).

- *Végétation de sous-bois* – Elle peut être altérée par l'application de N, quoique des effets à long terme ne se soient produits que lorsqu'il y a eu des applications successives.
- *Faune du sol* – Les études sur l'impact de l'application de N sur la faune du sol sont peu nombreuses. De fortes doses (> 150 kg N/ha) peuvent réduire les effectifs de certaines populations. Appliquée sous forme granuleuse, la cendre ne semble produire aucun effet nuisible. L'application de chaux favorise les escargots et les vers de terre à la défaveur d'autres groupes de petite faune. La réaction de la faune aquatique aux applications terrestres a à peine été étudiée. La chaux et les cendres de bois ont pour effet de réduire l'acidité dans les premiers centimètres de sol, mais les quantités habituellement épandues (2-3 t ha⁻¹) sont trop faibles pour agir sur l'alcalinité des eaux de ruissellement.
- *Microflore et microfaune du sol* – L'application de N peut influencer la production des fructifications de mycorrhizes, mais non des hyphes structurés autour des racines.
- *Propriétés du sol* – Les fertilisants en azote n'ont habituellement pas d'effet sur l'acidification du sol. Ils peuvent toutefois être fortement acidifiants si la nitrification induite est suivie de lessivage de nitrates. Les cendres de bois et la chaux sont connues pour améliorer les sols forestiers acides. La chaux a pour effet de faire monter le pH, le taux de saturation en bases en plus d'améliorer les conditions biotiques des sols.

- *Toxicité* – L'ajout de cendres a fait augmenter temporairement la biodisponibilité de cadmium (Cd). L'origine du matériel réduit en cendres, les conditions de combustion, l'efficacité de l'extraction des particules, le prétraitement à l'utilisation (durcissement et granulation), le degré d'altération et la taille des granules sont autant de paramètres à considérer dans la détermination du caractère toxique des cendres. La chaux pourrait également agir sur le déplacement des ions de métaux lourds.

Une des conclusions à laquelle arrivent les auteurs des articles que Nohrstedt a passés en revue est de considérer l'application des cendres de bois comme moyen pour réapprovisionner les sols forestiers en éléments nutritifs et renverser l'acidification. Si l'objectif est aussi d'accroître la productivité ou de raccourcir la période de révolution, l'amendement en N est jugé nécessaire dans certaines stations.

Conclusion

Les études menées jusqu'à maintenant – somme toute peu nombreuses – sur les effets de la période de révolution sur la fertilité à long terme des sols forestiers tendent à confirmer l'effet déséquilibrant du raccourcissement des périodes de révolution sur le cycle géochimique naturel des écosystèmes forestiers boréaux. Ces périodes correspondent souvent au moment où les concentrations d'éléments dans les arbres sont à leur maximum. L'exportation des éléments est encore plus marquée si le mode de récolte est par arbre entier. La période de révolution n'est donc pas le seul facteur qui, à long terme, influence la fertilité des sols forestiers. En plus de la période de révolution et du mode de récolte, rappelons les autres facteurs déterminants sur le maintien de la fertilité que sont la nature des essences en production prioritaire, le délai de régénération après perturbation et les traitements sylvicoles tels que la fertilisation et les éclaircies.

Cela dit, la fertilité intrinsèque du sol demeure le premier facteur à considérer dans le maintien de la fertilité des sols à long terme. Au Québec, la carte du bilan d'alcalinité du cycle géochimique de OUMET (2005) donne une indication de l'équilibre entre les gains d'éléments nutritifs et les pertes à l'échelle des districts écologiques. Bien que cette cartographie permette de tenir compte des préoccupations sur la fertilité des sols, elle devrait être faite à une échelle beaucoup plus fine pour définir les choix d'aménagement. Le travail se poursuit en ce sens.

En ce qui concerne l'intégration du concept de rotation écologique dans l'aménagement, certains aménagistes opteront pour la révolution écologique – généralement plus longue que l'âge d'exploitabilité basée sur la croisée de l'AAM et de l'AAC – mais procéderont à plus d'éclaircies de façon à mieux répartir dans le temps les exportations résultant de la récolte. D'autres choisiront de ne pas modifier l'âge de révolution, mais amenderont le sol avec des cendres de bois pour compenser la perte d'éléments nutritifs, comme l'envisagent de plus en plus les Scandinaves avec l'avènement de l'utilisation du bois comme source d'énergie. En tout état de cause, ces scénarios d'aménagement ont pour but d'assurer la productivité des forêts à long terme. L'aménagement basé sur le maintien à long terme de la productivité a toutes les chances d'assurer le maintien des activités économiques basées sur l'utilisation des ressources forestières.

Références bibliographiques

- ALBAN, D.H., 1982. *Effects of nutrient accumulation by aspen, spruce, and pine on soil properties*. Soil Sci. Soc. Am. J. 46 : 853-861.
- AUGUSTO, L., J. RANGER et M. BONNEAU, 2000a. *Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles*. Rev. For. Fr. 52(6) : 507-518.
- AUGUSTO, L., J. RANGER, Q. PONETTE et M. RAPP, 2000b. *Relationships between forest tree species, stand production and stand nutrient amount*. Ann. For. Sci. 57 : 313-324.
- BAILEY, S.E., D.W. SCHINDLER, B.R. PARKER, M.P. STANTON et K.G. BEATY, 1992. *Effects of forest fire and drought on acidity of a base-poor boreal forest stream: similarities between climatic warming and acidic precipitation*. Biogeochemistry 17 : 191-204.
- BÉLANGER, N., B. CÔTÉ, W.J. FYLES, F. COURCHESNE et H.W. HENDERSHOT, 2004. *Forest regrowth as the controlling factor of soil nutrient availability 75 years after fire in a deciduous forest of Southern Quebec*. Plant Soil 262 : 363-372.
- BOCK, M. et R.K. VAN, 2002. *Forest harvesting impacts on soil properties and vegetation communities in the Northwest Territories*. Can. J. For. Res. 32 : 713-724.
- BOUCHER, P. et B. CÔTÉ, 2002. *Characterizing base-cation immobilization in the stem of six hardwoods of eastern Canada*. Ann. For. Sci. 59(4) : 397-407.
- BRAIS, S., C. CAMIRÉ, Y. BERGERON et D. PARÉ, 1995. *Changes in nutrient availability and forest floor characteristics in relation to stand age and forest composition in the southern part of the boreal forest of northwestern Quebec*. For. Ecol. Manage. 76 : 181-189.

- BRUNNER, I., S. ZIMMERMANN, A. ZINGG et P. BLASER, 2004. *Wood-ash recycling affects forest soil and tree fine-root chemistry and reverses soil acidification*. Plant Soil 267(1-2) : 61-71.
- CHATARPAUL, L., D. BURGESS et I.R. METHVEN, 1985. *Equations for estimating above-ground nutrient content of six eastern Canadian hardwoods*. Rapport PI-X-55, Petawawa National Forestry Institute, Canadian Forest Service, Chalk River, Ontario. 19 p.
- CÔTÉ, B. et J.W. FYLES, 1994. *Nutrient concentration and acid-base status of leaf litter of tree species characteristic of the hardwood forest of southern Quebec*. Can. J. For. Res. 24 : 192-196.
- CURTIS, R.O., 1995. *Extended rotations and culmination age of coast Douglas-fir: old studies speak to current issues*. Res. Pap. PNW-RP-485, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR. 49 p.
- DAHLGREN, R.A. et C. DRISCOLL, 1994. *The effects of whole-tree clear-cutting on soil processes at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire, USA*. Plant Soil 158 : 239-262.
- DUCHESNE, L. et D. HOULE, 2006. *Basic cation cycling in a pristine watershed of the Canadian boreal forest*. Biogeochemistry 78 : 195-216.
- ERIKSSON, J., 1998. *Dissolution of hardened wood ashes in forest soils: studies in a column experiment*. Scand. J. For. Res. Suppl. 2 : 23-32.
- ERIKSSON, M.H., T. NILSSON et A. NORDIN, 1998. *Early effects of lime and hardened and non-hardened ashes on pH and electrical conductivity of the forest floor, and relations to some ash and lime qualities*. Scand. J. For. Res. Suppl. 2 : 56-66.
- FEDERER, C.A., J.W. HORNBECK, L.M. TRITTON, C.W. MARTIN et R.S. PIERCE, 1989. *Long-term depletion of calcium and other nutrients in eastern US forests*. Environ. Manage. 13 : 593-601.
- FOSTER, N.W., I.K. MORRISON, P.W. HAZLETT, G.D. HOGAN et M.I. SALERNO, 1995. *Carbon and nitrogen cycling within mid- and late-rotation jack pine*. Dans : W.W. McFee et J.M. Kelly (Éditeurs), Carbon forms and functions in forest soils. SSSA Inc., Madison, WI. p. 355-376.
- GOULDING, K.W.T. et P.A. STEVENS, 1988. *Potassium reserves in a forested, acid upland soil and the effect on them of clear-felling versus whole-tree harvesting*. Soil Use Manage. 4 : 45-51.

- GRESHAM, C.A., 2002. *Sustainability of intensive loblolly pine plantation management in the South Carolina Coastal Plain, USA*. For. Ecol. Manage. 155(1-3) : 69-80.
- GRIER, C.C., 1975. *Wildfire effects on nutrient distribution and leaching in a coniferous ecosystem*. Can. J. For. Res. 5 : 599-607.
- HÅNELL, B. et T. MAGNUSSON, 2005. *An evaluation of land suitability for forest fertilization with biofuel ash on organic soils in Sweden*. For. Ecol. Manage. 209(1/2) : 43-55.
- HARDIE, I.W., J.N. DABERKOW et K.E. MCCONNELL, 1984. *A timber harvesting model with variable rotation lengths*. For. Sci. 30 : 511-523.
- HAWLEY, G.J., P.G. SCHABERG, C. EAGAR et C.H. BORER, 2006. *Calcium addition at the Hubbard Brook Experimental Forest reduced winter injury to red spruce in a high-injury year*. Can. J. For. Res. 36 : 1-6.
- HENDRICKSON, O.Q., L. CHAPARTAU et D. BURGESS, 1989. *Nutrient cycling following whole-tree and conventional harvest in northern mixed forest*. Can. J. For. Res. 19 : 725-735.
- HUNTINGTON, T.G., D.R. PEART, J. HORNIG, D.F. RYAN et S. RUSSO-SAVAGE, 1990. *Relationships between soil chemistry, foliar chemistry, and condition of red spruce at Mount Moosilauke, New Hampshire*. Can. J. For. Res. 20 : 1219-1227.
- HYYTÄINEN, K. et O. TAHVONEN, 2002. *Economics of forest thinnings and rotation periods for Finnish conifer cultures*. Scand. J. For. Res. 17 : 274-288.
- JACOBSON, S., 2003. *Addition of stabilized wood ashes to Swedish coniferous stands on mineral soils - effects on stem growth and nutrient concentrations*. Silva Fenn. 37 : 437-450.
- JEWETT, K., D. DAUGHARTY, H.H. KRAUSE et P.A. ARP, 1995. *Watershed responses to clear-cutting : effects on soil solutions and stream water discharge in central New Brunswick*. Can. J. Soil Sci. 75(4) : 475-490.

- KIMMINS, H., 1994. *Forest manipulation. Impacts on forest ecosystem sustainability*. In : M.K. Mahendrappa, C.M. Simpson et C.T. Smith (Editors), *Assessing the effects of silvicultural practices on sustained productivity: a proceeding of the IEA/BE Workshop '93*. Canadian Forest Service - Maritimes Region, Natural Resources Canada, Fredericton, NB, Canada. p. 23-31.
- KIMMINS, J.P., 1974. *Sustained yield, timber monitoring, and the concept of ecological rotation in British Columbian view*. For. Chron., Février : 27-31.
- KOPRA, K. et J. FYLES, 2005. *Nutrient accounting for black spruce plantations in northern Ontario*. SFMN Res. Not. Series No. 7, Réseau de gestion durable des forêts, University of Alberta, Edmonton, AB.
- KUKKOLA, M. et J. SARAMÄKI, 1983. *Growth response in repeatedly fertilized pine and spruce stands on mineral soils*. Commun. Inst. For. Fenn. 114 : 55
- KUTIEL, P. et A. SHAVIV, 1992. *Effects of soil type, plant composition and leaching on soil nutrient levels following experimental burning in a boreal mixedwood stand*. For. Ecol. Manage. 53 : 29-343.
- LAMARCHE, J., R.L. BRADLEY, D. PARÉ, S. LÉGARÉ et Y. BERGERON, 2004. *Soil parent material may control forest floor properties more than stand type or stand age in mixedwood boreal forests*. Ecoscience 11(2) : 228-237.
- LAWRENCE, G.B., M.B. DAVID, S.W. BAILEY et W.C. SHORTLE, 1997. *Assessment of calcium status in soils of red spruce forests in the northeastern United States*. Biogeochemistry 38 : 19-39.
- LÉGARÉ, S., D. PARÉ et Y. BERGERON, 2004. *The responses of black spruce growth to an increased proportion of aspen in mixed stands*. Can. J. For. Res. 34(2) : 405-416.
- LIKENS, G.E., F.H. BORMANN, N.M. JOHNSON, D.W. FISHER et R.S. PIERCE, 1970. *The effects of forest cutting and herbicide treatments on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem*. Ecol. Monogr. 40 : 23-47.
- LONG, P.L., S.B. HORSLEY et P.R. LILJA, 1997. *Impact of forest liming on growth and crown vigor of sugar maple and associated hardwoods*. Can. J. For. Res. 27 : 1560-1573.

- MAHENDRAPPA, M.K., C.M. SIMPSON et C.T. SMITH, 1994. *Assessing the effects of silvicultural practises on sustained productivity : a proceedings of the IEA/BE WORKSHOP'93 May-16-22. Fredericton, N.B., Canada*. Information Report M-X-191 Canadian Forest Service - Maritimes Region - Natural Resources Canada. 91 p.
- MALMSTRÖM, C., 1953. *Skogsforskningen har ordet*. Skogen, 40 : 30-31 (En suédois).
- MEIWES, K.J., P.K. KHANNA et B. ULRICH, 1986. *Parameters for describing soil acidification and their relevance to the stability of forest ecosystems*. For. Ecol. Manage. 15 : 161-179.
- MOILANEN, M. et J. ISSAKAINEN, 2000. *Tuhkalannoituksen metsävaikutukset* (Effects of wood ash on forests). Metsätehon Raportii 93 : 18 (En finlandais).
- MOORE, J.-D. et R. OUMET, 2006. *Ten-year effect of dolomitic lime on the nutrition, crown vigor and growth of sugar maple*. Can. J. For. Res. 36 : 1834-1841.
- MORRIS, D.M., J.P. KIMMINS et D.R. DUCKERT, 1997. *The use of soil organic matter as a criterion of the relative sustainability of forest management alternatives : A modelling approach using FORECAST*. For. Ecol. Manage. 94(1-3) : 61-78.
- MOU, P., T.J. FAHEY et J.W. HUGHES, 1993. *Effects of soil disturbance on vegetation recovery and nutrient accumulation following whole-tree harvest of a northern hardwood ecosystem*. J. Appl. Ecol. 30 : 661-675.
- NEWMAN, D.H., 1988. *The optimal forest rotation : a discussion and annotated bibliography*. Gen. Tech. Rep. SE-48, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, NC.
- NOHRSTEDT, H., 2001. *Response of coniferous forest ecosystems on mineral soils to nutrient additions : A review of Swedish experiences*. Scand. J. For. Res. 16(6) : 555-573.
- OLSSON, B.A., J. BENGTTSSON et H. LUNDKVIST, 1996. *Effects of different forest harvest intensities on the pools of exchangeable cations in coniferous forest soils*. For. Ecol. Manage. 84 : 135-147.
- ORDRE DES INGÉNIEURS FORESTIERS DU QUÉBEC, 1996. *Manuel de foresterie. Chapitre 1 - Géologie, dépôts de surface et sols forestiers*. Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada. p. 3-95.

- OUMET, R., 2005. *Cartographie des charges critiques d'acidité des forêts : deuxième approximation*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Québec. Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 487.
- OUMET, R. et C. CAMIRÉ, 1995. *Foliar deficiencies of sugar maple stands associated with soil cation imbalances in the Quebec Appalachians*. Can. J. Soil Sci. 75 : 169-175.
- PARÉ, D. et Y. BERGERON, 1996. *Effect of colonizing tree species on soil nutrient availability in a clay soil of the boreal mixedwood*. Can. J. For. Res. 26 : 1022-1031.
- PARÉ, D., P. ROCHON et S. BRAIS, 2002. *Assessing the geochemical balance of managed boreal forests*. Ecol. Indicat. 1 : 293-311.
- PARK, B.B., R.D. YANAI, J.M. SAHM, D.K. LEE et L.P. ABRAHAMSON, 2005. *Wood ash effects on plant and soil in a willow bioenergy plantation*. Biom. Bioenergy 28(4) : 355-365.
- PERKIOMAKI, J. et H. FRITZE, 2002. *Short and long-term effects of wood ash on the boreal forest humus microbial community*. Soil Biol. Biochem. 34(9) : 1343-1353.
- PRESCOTT, C.E. et S.M. BROWN, 1998. *Five-year growth responses of western red cedar, western hemlock, dans amabilis fir to chemical and organic fertilizers*. Can. J. For. Res. 28 : 1328-1334.
- PRISLEY, S.P. et A.J. MALMQUIST, 2002. *Impacts of rotation age changes on growth/removals ratios*. South. J. Appl. For. 26 : 72-77.
- RAISON, R.J., 1979. *Modification of the soil environment by vegetation fires, with particular reference to nitrogen transformations : a review*. Plant Soil 51 : 73-108.
- RANGER, J., S. ALLIE, D. GELHAYE, B. POLLIÉ, M.-P. TURPAULT et A. GRANIER, 2002. *Nutrient budgets for a rotation of a Douglas-fir plantation in the Beaujolais (France) based on a chronosequence study*. For. Ecol. Manage. 171(1-2) : 3-16.
- RANGER, J. et M.-P. TURPAULT, 1999. *Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management*. For. Ecol. Manage. 122(1-2) : 139-154.

- REINERS, W.A., 1992. *Twenty years of ecosystem reorganization following experimental deforestation and regrowth suppression*. Ecol. Monogr. 62 : 503-523.
- RUBILAR, R.A., H.L. ALLEN et D.L. KELTING, 2005. *Comparison of biomass and nutrient content equations for successive rotations of loblolly pine plantations on an Upper Coastal Plain Site*. Biom. Bioenergy 28(6) : 548-564.
- RUBIO, A. et A. ESCUDERO, 2003. *Clear-cut effects on chestnut forest soils under stressful conditions: lengthening of time-rotation*. For. Ecol. Manage. 183 : 195-204.
- SAARSALMI, A., E. MÄLKÖNEN et M. KUKKOLA, 2004. *Effect of wood ash fertilization on soil chemical properties and stand nutrient status and growth of some coniferous stands in Finland*. Scand. J. For. Res. 19 : 217-233.
- SIKSTRÖM, U., 1992. *Stemgrowth of Scots pine and Norway spruce on mineral soils after treatment with a low lime dose, nitrogen fertilizer and wood ash*. Institutet för Skogsförbättring, Rapport 27. 22 p (En suédois).
- SMITH, D.W., 1970. *Concentrations of nutrients before and after fire*. Can. J. For. Res. 50 : 17-29.
- SVERDRUP, H. et K. ROSEN, 1998. *Long-term base cation mass balance for Swedish forests and the concept of sustainability*. For. Ecol. Manage. 110 : 221-236.
- THIFFAULT, E., D. PARÉ, N. BÉLANGER, A.D. MUNSON et F. MARQUIS, 2006. *Harvesting intensity at clear-felling in the boreal forest: impact on soil and foliar nutrient status*. Soil Sci. Soc. Am. J. 70 : 691-701.
- THIFFAULT, E., N. BÉLANGER, D. PARÉ, W.H. HENDERSHOT et A.D. MUNSON, 2007. *Investigating the soil-base status in managed boreal forests using the SAFE model*. Ecol. Mod. 206 : 301-321.
- UBA, 2004. *Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects risks, and trends. Chapitre 5. Mapping critical loads*. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Berlin, Germany. p. V 1-V 44.
- WEI, X., J.P. KIMMINS et G. ZHOU, 2003. *Disturbances and the sustainability of long-term site productivity in lodgepole pine forests in the central interior of British Columbia - an ecosystem modeling approach*. Ecol. Mod. 164 : 239-256.

WEI, X., W. LIU, J. WATERHOUSE et M. ARMLEDER, 2000. *Simulations on impacts of different management strategies on long-term site productivity in lodgepole pine forests of the central interior of British Columbia*. For. Ecol. Manage. 133(3) : 217-229.

WILMOT, T.R., D.S. ELLSWORTH et M.T. TYREE, 1996. *Base cation fertilization and liming effects on nutrition and growth of Vermont sugar maple stands*. For. Ecol. Manage. 84 : 123-134.