



Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement

Volume 6 Numéro 2 | septembre 2005

Dossier: L'aménagement forestier : les enjeux sociaux, économiques et environnementaux

La problématique de l'utilisation des herbicides en foresterie: le cas du Québec

J. FORTIER, C. MESSIER ET L. COLL

Résumés

La problématique de l'utilisation des herbicides en foresterie est analysée selon une perspective historique et environnementale. Le développement des herbicides chimiques remonte à la fin de la deuxième guerre mondiale. Les premiers herbicides organochlorés étaient très efficaces, mais ils sont aussi très toxiques pour l'humain et l'environnement. Les herbicides développés plus récemment, comme le glyphosate, sont tout aussi efficace et beaucoup moins toxiques, mais ils sont mal perçus par la population. Au Québec, l'utilisation de tous les herbicides en forêt publique fut prohibée suite à une évaluation environnementale rigoureuse. Il semble que la décision d'abolir son utilisation était plus politique que scientifique. En effet, une comparaison sommaire des impacts environnementaux possibles du glyphosate comparativement aux dégagements mécaniques manuels et mécanisés ne permet pas de dégager lequel des traitements est préférable au niveau strictement environnemental. Puisque certains herbicides permettent une meilleure croissance des plantations, il est possible d'imaginer que ce gain de croissance pourrait être utilisé pour augmenter les aires protégées et le niveau d'aménagement écosystémique sur une proportion plus grande du territoire. Néanmoins l'utilisation d'herbicides devrait être largement surveillée tant au niveau de l'application qu'au niveau du suivi environnemental.

Herbicide use in forestry is analysed from an historical and environmental perspective. First chemical herbicides were developed during the Second World War. Organochloride herbicides were widely used in the past but they are now classified as very harmful for human and the environment. However, recently developed herbicides like glyphosate present the same efficiency and a much lower toxicity. In general, the public opinion about herbicides is strongly negative. In Québec, all herbicides were banned from use in public forest after some environmental assessments. This decision seems to be more politically than scientifically based. In the case of intensive managed forest, mechanical treatments with forest tractors can present similar or even lower environmental impacts than glyphosate, but few studies exist to make an objective comparison. Furthermore, in terms

of tree growth, low toxicity herbicides seem to present higher effectiveness than mechanical treatments. This possible growth gain can then be used to reduce pressure on natural forest by increasing protected areas and the use of ecosystem forest management. Nevertheless, the use of herbicides must be strictly monitored to reduce environmental risks.

Entrées d'index

Mots-clés : Québec, foresterie, gestion de la végétation accompagnatrice, historique, glyphosate, impacts environnementaux, alternatives, traitements mécaniques, traitements chimiques

Keywords : Québec, forestry, forest vegetation management, historic, glyphosate, environmental impacts, alternatives, mechanical treatments, chemical treatments

Lieux d'étude : Amérique du Nord

Texte intégral

Introduction

- 1 C'est principalement à partir des années 1980 que les pays commencent à prendre conscience du rôle global que joue la forêt au niveau de la stabilité de la biosphère, du maintien de la biodiversité et de la protection des civilisations autochtones menacées (FAO, 1994). Toutefois, l'accroissement démographique actuel mène à une augmentation des besoins en ressources renouvelables comme le bois, ce qui se traduit par d'énormes pressions sur les écosystèmes forestiers (Kimmins, 2004). Dans un tel contexte, on observe de plus en plus une division entre forêt productive où on essaye d'extraire le maximum de bois et forêt de conservation où les autres valeurs sont protégées ou priorisées. Il devient donc urgent de maximiser la production de bois dans ces zones productives et une certaine gestion de la végétation accompagnatrice, terme emprunté à l'expression anglo-saxonne « forest vegetation management » est souvent nécessaire.
- 2 La végétation accompagnatrice comprend les espèces des strates herbacées et arbustives, les mousses, les fougères, les lianes et d'autres bryophytes. Elle constitue donc l'ensemble des espèces végétales présentes à côté des essences forestières exploitées. L'impact de cette végétation dans l'établissement et la croissance des plantations est critique puisque, dépendamment de la nature des espèces accompagnatrices, des effets inhibiteurs ou bénéfiques peuvent être observés (Frochet et al, 2002).
- 3 Présentement, il existe plusieurs techniques pour maîtriser la végétation accompagnatrice ayant un effet inhibiteur sur la croissance des arbres en milieu forestier. Les deux pratiques les plus couramment utilisées sont les traitements mécaniques (manuel ou motorisé) et les traitements chimiques par épandage aérien ou terrestre (manuel ou motorisé) d'herbicides. A cela, s'ajoutent diverses alternatives comme l'utilisation du feu (Feller, 1996) l'introduction de plantes couvre-sol (Thomas et Steen, 1996 ; Provendier et Balandier, 2004 ; Schutz, 2004), l'utilisation des moutons (Newsome, 1996; Negrave, 1996) ou de d'autres animaux domestiques (Mount, 1992; Luginbuhl et Green 2005), l'application de produits naturels comme substances herbicides (Duke et al., 2000; Micheal et Hermy, 2002), l'utilisation de jute couvre-sol ou paillis (McDonald et Fiddler, 1996), l'application d'organismes pathogènes, comme le champignon

- *Chondrosterum purpureum* (Becker et al., 2005), etc.
- 4 Par ailleurs, le coût de ces diverses opérations varie considérablement tout comme leur efficacité. Ainsi, le choix du type de gestion de la végétation accompagnatrice dépend en partie du système de production envisagé et des investissements disponibles (Frochot et al. 2002, 2003). Dans un système de production forestière intensif, un contrôle de la végétation en fonction d'un seuil économique sera préconisé afin d'optimiser la production ligneuse. Dans le cas d'un système extensif, on mettra plutôt sur l'optimisation des effets auxiliaires de la végétation accompagnatrice (e.g. maintien de la biodiversité, conservation des habitats, brout pour la faune, etc.) plutôt que d'opter pour une élimination systématique.
- 5 Les considérations environnementales sont ainsi devenues une composante majeure de la gestion de la végétation accompagnatrice. D'ailleurs l'un des critères écologiques fondamentaux de la foresterie durable repose sur le maintien et la conservation de la biodiversité (Linhgren et Sullivan, 2001). Il est donc nécessaire de choisir des traitements qui n'occasionnent pas d'impact négatif sur l'environnement en termes de pollution de l'eau, du sol, de l'air, de toxicité sur les animaux, de pertes d'espèces ou de modifications à long terme de la structure et de la composition en espèces végétales et animales.
- 6 Mis à part les considérations économiques et environnementales, le choix du type de gestion de la végétation accompagnatrice dépend largement des perceptions et des valeurs du grand public et des groupes de pression (Wagner et al., 1998; Messier et Kneeshaw, 1999). Ainsi, l'intégration de cette composante sociale qui souvent ne perçoit pas le risque de la même manière que la communauté scientifique, prend depuis quelques années une importance grandissante dans le processus de prise de décision.
- 7 Dans cet article, nous procéderons à une analyse approfondie de la problématique de l'utilisation des herbicides dans le cadre d'une gestion de la végétation accompagnatrice dans les aires de reboisement destinées à un aménagement intensif. L'article est divisé en trois parties : dans la première partie, un bref historique de l'utilisation de ces herbicides chimiques en foresterie est réalisé avec une attention particulière pour le cas du Québec. Par la suite, les impacts environnementaux des herbicides (en mettant l'accent sur le glyphosate) sont effectués et comparés à ceux des méthodes alternatives. La dernière partie de l'article est consacrée aux impacts associés aux diverses alternatives de gestion de la végétation.

Historique du développement et de l'utilisation des herbicides en milieu forestier

- 8 L'utilisation de substances chimiques pour réaliser le contrôle de la végétation remonte à plus d'un siècle. C'est en Allemagne, vers les années 1850, que la première substance herbicide voit le jour, un mélange de sel et de jus de lime était alors utilisé. Il a fallu ensuite plusieurs décennies avant de voir apparaître de nouveaux produits chimiques pour contrôler la végétation (cette revue historique a été adaptée de l'article de McCormack, 2000).
- 9 *Les années 1940-60* : La deuxième Guerre Mondiale a permis l'avancement de nombreuses technologies et c'est dans ce contexte d'innovation que les

propriétés phytotoxiques de l'acide 2,4-dichlorophénoxyacétique (2,4-D) ont été élucidées. Deux laboratoires indépendants (Angleterre et États-Unis) synthétisent la même substance chimique presque au même moment. Suite à cette découverte, le premier épandage aérien d'herbicide (2,4-D) à des fins sylvicoles a lieu en 1947 dans le Nord-Est des États-Unis.

10 Durant la période d'après-guerre, la demande en bois augmente considérablement et le besoin de produire plus de matière ligneuse est fortement ressenti. Suite à de nombreux efforts de recherche, le potentiel de l'acide 2,4,5-trichlorophénoxyacétique (2,4,5-T) pour dégager les plantations de conifères est confirmé. Les premiers essais ont lieu sur le pin dans la forêt expérimental de Massabesic (Maine, États-Unis). L'application de cette substance se faisait alors par avion ou hélicoptère.

11 Au cours des années 1960, l'industrie agricole connaît une progression technologique fulgurante et elle développe alors d'autres technologies et d'autres substances phytotoxiques pour intensifier sa production. À cette époque donc, les technologies utilisées pour gérer la végétation accompagnatrice proviennent essentiellement d'adaptations d'outils disponibles en agriculture. En foresterie, l'épandage manuel au sol d'herbicides est néanmoins développé. Les travailleurs munis de sac à dos peuvent maintenant arroser les aires de traitements de manière plus contrôlée. C'est aussi durant cette période qu'un petit livre écrit par Mme Rachel Carson, *Silent spring* (1962) est publié. Comme son titre l'indique, ce livre faisait état d'un printemps hypothétique sans le gazouillement des oiseaux dû à leur élimination systématique par l'épandage des herbicides synthétiques. Ce livre eut un impact majeur sur la perception du public vis-à-vis de l'usage grandissant des herbicides synthétiques et de leurs risques pour la santé des écosystèmes naturels et des humains.

12 *Les années 1970-80* : Encore une fois, c'est un conflit géopolitique qui est responsable de l'évolution de l'utilisation des herbicides. Durant la Guerre du Vietnam, de nombreuses combinaisons d'herbicides sont testées à des fins militaires. C'est le célèbre *Agent Orange* (un mélange de 2,4-D et de 2,4,5-T) qui est retenu pour la stratégie militaire de défoliation de la jungle vietnamienne. L'extraordinaire efficacité de ces herbicides et leurs impacts sur la santé humaine ont eu un effet important sur la perception du public face à ces nouvelles substances chimiques alors utilisées couramment en agriculture, horticulture et foresterie. Cependant, contrairement aux herbicides utilisés pour la production agricole ou sylvicole, les herbicides développés à des fins militaires ne passaient devant aucune commission afin d'être homologué. Par conséquent, ces herbicides pouvaient contenir des quantités de contaminants, comme les dioxines, beaucoup plus élevées que ceux prévus par les critères d'homologation.

13 Pendant cette même période, la conscience sociale face aux risques des substances chimiques se développe suite à des incidents industriels comme la fuite de TCDD (une dioxine fortement toxique) à Seveso en Italie en juillet 1976. Le TCDD est alors identifié comme un contaminant présent à l'état de trace dans certains herbicides de type phenoxy (comme le 2,4,5-T) lorsqu'ils sont produits à certaines températures.

14 C'est l'anticipation de l'éventuelle interdiction d'utiliser le 2,4,5-T qui stimule les efforts de recherche sur le glyphosate et certaines autres substances phytotoxiques. En 1974-1975, de nombreuses expériences forestières concernant les herbicides ont lieu dans l'état du Maine. Le glyphosate, l'hexazinone et le triclopyr sont alors testés pour la première fois et comparés aux herbicides classiques tels que le 2,4-D, le 2,4-DP, le picloram et le MSMA.

15 En 1977 les premiers essais d'épandage aérien de glyphosate et de triclopyr en milieu forestier ont lieu en Amérique du Nord. Avant ces essais, le dégagement était réalisé seulement à l'aide d'herbicide de type phenoxy. Enfin, en 1979, les états de l'Oregon, du Maine et du Vermont (États-Unis) enregistrent le glyphosate pour l'épandage aérien en milieu forestier.

16 La période 1979-1983 est marquée par des recherches intenses sur les risques du 2,4,5-T et le 2,4,5-TP sur l'environnement et la santé humaine. Ces recherches mèneront à leur bannissement aux États-Unis. En 1980, toujours aux États-Unis, le gouvernement fédéral permet l'utilisation du glyphosate en foresterie. Quatre ans plus tard, en 1984, le Canada emboîte le pas et permet aussi son utilisation en forêt.

17 Dès ce moment, l'usage du glyphosate devient très répandu pour dégager les plantations et optimiser la croissance des plants. De nombreuses études toxicologiques, écotoxicologiques et écosystémiques sont alors réalisées afin de tester l'effet du glyphosate sur l'environnement et la santé humaine.

18 *Les années 1990-2000* : La gestion de la végétation accompagnatrice prend de plus en plus d'importance à l'échelle internationale. On assiste ainsi en 1992 à la première *International Conference on Forest Vegetation Management* (IFVMC) qui deviendra, à chaque trois ans, l'occasion pour les chercheurs d'échanger leurs découvertes dans ce domaine.

19 Au niveau législatif, l'état du Vermont (États-Unis) bannit en 1997 les herbicides en foresterie en imposant un moratoire de 10 ans sur leur utilisation. En 1998, un groupe de pression tente de faire bannir les herbicides en foresterie au New Hampshire (État-Unis), mais l'état refuse cette mesure, la jugeant excessive et restrictive. Quelques années plus tard en 2001, au Maine (États-Unis), un référendum approuve un moratoire de 10 ans sur l'utilisation des pesticides en milieu forestier. Au Canada, seul le Québec suit un processus similaire et déclare un moratoire sur l'utilisation des herbicides en milieu forestier.

20 *Situation actuelle* : Des pays comme la France, la Grande-Bretagne, la Nouvelle-Zélande, Israël, la République Tchèque et la Finlande utilisent, encore, une gamme relativement restreinte d'herbicides pour optimiser leur production ligneuse alors que d'autres pays comme la Suisse et la Suède ont complètement banni leur usage. Aux États-Unis, l'usage d'herbicides est permis et comme nous l'avons vu, il en revient aux états de légiférer sur les conditions spécifiques de leur usage. Présentement, tous les états limitrophes au Canada, mis à part le Maine et le Vermont, peuvent utiliser des herbicides en milieu forestier.

21 Au Canada, certains herbicides sont approuvés pour le contrôle de la végétation accompagnatrice en forêt, mais la législation en matière d'herbicides dépend aussi des volontés politiques de chacune des provinces. Le Québec est actuellement la seule province canadienne à n'autoriser aucun herbicide en milieu forestier.

22 En sol canadien, seulement quatre substances actives (pour un total de 11 formulations herbicides) sont enregistrées pour un usage forestier, mais trois sont réellement utilisés : 2,4-D, glyphosate et napropamide (ARLA, 2006). Le glyphosate (Vision MD) demeure néanmoins le plus populaire et il est utilisé dans plus de 90% des cas au cours des années 90 (Thompson et Pitt, 2003). Au cours de cette même période, l'Ontario a été la province canadienne qui a utilisé le plus d'herbicide en forêt avec 43% des quantités totales utilisées au Canada, alors que la Colombie-Britannique et le Nouveau-Brunswick en ont fait un usage moins important (Thompson et Pitt, 2003).

Historique de l'utilisation des herbicides au Québec

23 Au Québec, la problématique de l'utilisation des herbicides en milieu forestier a évolué de concert avec les préoccupations et les revendications de la population et des groupes de pression. Pour cette raison, les programmes gouvernementaux d'épandage d'herbicides et les stratégies d'exploitation forestière se sont retrouvés, comme nous allons le voir plus bas, plus d'une fois au Bureau d'Audience Publique en Environnement (le BAPE). Cet organisme gouvernemental québécois a la mission d'informer et de consulter la population sur des questions relatives à la qualité de l'environnement que lui soumet le ministre du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs afin d'éclairer la prise de décisions de l'État dans une perspective de développement durable. Le BAPE est donc une sorte de médiateur entre le gouvernement, l'industrie et la population qui déploie les moyens nécessaires pour favoriser la participation active des citoyens.

24 L'utilisation d'herbicides en foresterie a commencé au tournant des années 70 au Québec, mais ce n'est pas avant le début des années 80 que le Ministère de l'Énergie et des Ressources (MER) élabore son premier projet de pulvérisation aérienne d'herbicides. Le projet était destiné à couvrir, par épandage aérien, 10 506 ha en 1983 et 11 452 ha en 1984 dans les régions administratives du Bas Saint-Laurent – Gaspésie, de la Mauricie, de l'Abitibi – Témiscamisque et de la Côte-Nord. On prévoyait alors utiliser pour l'année 1983, le 2,4-D sur environ 10% du territoire et le 2,4,5-T sur le reste tandis que durant l'année 1984 le 2,4,5-T serait l'unique herbicide utilisé. Ce projet a rapidement soulevé un important débat public à cause de l'évidence grandissante de la grande toxicité des impuretés contenues dans le 2,4,5-T. Face à cette controverse, le ministère de l'Environnement confie au BAPE, en mars 1983, le mandat d'enquêter et de tenir des audiences publiques relativement au projet de pulvérisation aérienne d'herbicides en milieu forestier. Les conclusions et recommandation du BAPE sur le projet de pulvérisation aérienne d'herbicides en milieu forestier de 1983-84 ont été les suivantes :

- Le 2,4,5-T est potentiellement toxique à cause du contaminant TCDD (une dioxine) et son utilisation comporte un trop grand risque pour l'humain et l'écosystème. La toxicité du 2,4-D étant moins probante que celle du 2,4,5-T, son utilisation devrait cependant être substituée par les moyens mécanisés de dégageant.
- Les moyens mécaniques ne peuvent présentement substituer les moyens chimiques adéquatement car ils n'ont pas encore été soumis à une évaluation rigoureuse. Leur efficacité et praticabilité en milieu forestier québécois est donc incertaine. (BAPE, 1983-1984)

25 Suite à ces recommandations du BAPE, le Gouvernement décida donc d'interdire toute utilisation de 2,4,5-T et de 2,4-D en forêt. Il n'a cependant pas fallu attendre bien longtemps pour voir d'autres herbicides faire leur apparition en foresterie. En 1984, le glyphosate, sous la formulation commerciale Vision MD, est homologué au Canada et il devient en 1985 l'herbicide par excellence pour dégager les plantations de résineux au Québec (Legris, 1989).

26 À cette époque, on assiste à un effort considérable de reboisement catalysé par l'adoption en 1986 de la *Loi sur les forêts* et en 1989 de la *Politique d'utilisation*

- des pesticides en milieu forestier (MRNF, 2005). Pour la période de 1988 à 1993, des superficies moyennes de 31 000 ha sont ainsi traitées par le glyphosate chaque année (BAPE, 1997) et ce n'est qu'à partir de 1994 que les superficies dégagées avec des herbicides commencent à diminuer (figure 1).

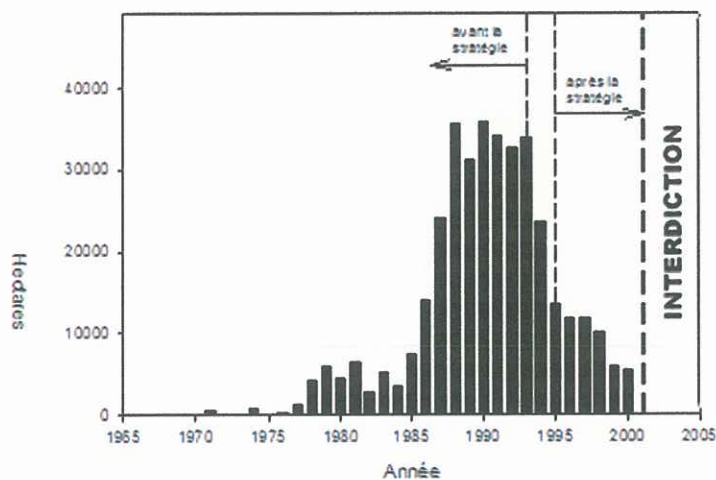


Figure 1. Utilisation de d'herbicides dans le milieu forestier québécois depuis 1971 (d'après le MRNF, 2005)

- 27 Cette baisse substantielle dans l'utilisation d'herbicides chimiques de dégagement coïncide avec l'adoption de la *Stratégie de protection des forêts* du ministère des Forêts (MFO) en 1994. Un des engagements au cœur de la stratégie du MFO était d'éliminer complètement l'utilisation des herbicides chimiques en forêt publique au cours des prochains dix ans. Cet engagement ministériel n'a cependant pas fait l'unanimité chez les compagnies forestières, les ingénieurs forestiers responsables de la gestion des forêts et Hydro-Québec qui se devait de dégager la végétation sous les lignes à haute tension. Cette période de 10 ans était perçue comme irréaliste. Après avoir étudié ce projet de loi, le BAPE proposait déjà en 1991 une mesure encore plus drastique, soit « que le recours aux herbicides chimiques soit banni d'ici cinq ans après l'adoption de la Stratégie ». Selon le BAPE, ce délai de cinq ans était suffisant pour améliorer l'efficacité des méthodes mécaniques (alternatives aux herbicides) sur le plan de l'environnement et de la santé.
- 28 En 1997, on assiste à une autre audience publique du BAPE sur le *Programme de dégagement de la régénération forestière*. Ce projet du MRN était alors destiné à couvrir la période de 5 ans précédent l'arrêt complet de l'utilisation des herbicides en milieu forestier fixé pour 2001. Suite à l'audience, le BAPE recommande plutôt au MRN de ne retenir que le scénario de dégagement mécanique et biomécanique et d'éliminer complètement l'utilisation des herbicides. Les raisons évoquées par le BAPE ont été les suivantes :

- À la lumière des informations disponibles, les impacts environnementaux découlant de l'utilisation du glyphosate sont supérieurs à court terme à ceux du mode de dégagement mécanique particulièrement en ce qui a trait à la dynamique des populations fauniques
- La crainte de la population pour tout ce qui est chimique est trop grande
- Le Gouvernement doit maintenir son engagement de bannir les herbicides au plus tard en 2001
- Cette décision va dans le sens du principe de prudence développé par la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement
- Le dégagement mécanique est perçu comme un outil de développement

économique et social régional puisqu'il crée beaucoup plus d'emplois

29 Bien que la participation à l'audience publique à été jugée faible par certains participants, les revendications sociales et environnementales de la population ont eu les dessus sur les revendications économiques des industriels et du gouvernement (BAPE, 1997).

30 Le Gouvernement décide donc finalement en 2001 d'abolir l'utilisation des herbicides en milieu forestier. Cette mesure ne s'applique qu'en forêt publique, mais depuis, le Gouvernement ne subventionne plus les travaux sylvicoles faits en forêt privée s'il y a utilisation d'herbicides. Depuis, la gestion de la végétation accompagnatrice s'effectue principalement de façon mécanique suivant les recommandations du BAPE après l'audience publique de 1997 (Dubois, 2002). L'usage des herbicides demeure néanmoins permis pour certaines activités forestières autres que le dégagement des plantations, pour les bleuétières du lac St-Jean, par exemple. L'utilisation d'herbicides est permise, cependant, pour supprimer ou contrôler la végétation sur les routes forestières et sous les lignes à haute tension (Loi sur les pesticides, Québec, 2005).

31 Actuellement, outre les traitements mécanisés qui sont principalement utilisés, une stratégie de reboisement hâtif est mise en oeuvre dans les stations où la compétition végétale s'avère forte (Thiffault et al., 2003). Au niveau de la recherche, un modèle de maîtrise intégrée de la végétation forestière adapté aux caractéristiques écologiques des stations reboisées est en plein développement (Roy et al., 2003). Ce modèle comprend l'utilisation des opérations de préparation de terrain, de reboisement hâtif, de mise en terre de plants de fortes dimensions et de dégagement mécanique (essentiellement manuel) de plantations. Un réseau de 14 stations expérimentales, couvrant trois régions écologiques distinctes, a ainsi été créé afin d'étudier l'effet combiné de ces diverses stratégies (Roy et al., 2003). Cette stratégie de maîtrise intégrée de la végétation semble être efficace dans les plantations résineuses (Thiffault et al. 2004), ce qui est de bon augure puisque c'est cette forme de régénération artificielle qui est majoritaire au Québec.

Les impacts environnementaux des herbicides : le cas du glyphosate

32 Aujourd'hui, les herbicides sont reconnus comme des substances chimiques relativement dangereuses pour la santé humaine et celle des écosystèmes. Parmi les herbicides les plus utilisées, on en retrouve qui sont potentiellement cancérigènes et/ou perturbateurs du système endocrinien (NCAP, 1999a) Une fois lessivés par l'eau de pluie ou dispersés par le vent, certains de ces composés chimiques se retrouvent dans les cours d'eau et les aquifères (NCAP, 1999b). De plus, quelques un de ces herbicides appartiennent à la classe des produits chimiques persistants en raison de leur potentiel de bioaccumulation. Cependant, ce ne sont pas tous les herbicides qui ont la même toxicité pour l'environnement. Le glyphosate, un ingrédient actif développé par Monsanto sous plusieurs formulations, est largement utilisé en foresterie pour éliminer la végétation compétitrice. Au Canada, en 1998 environ 38% des traitements sylvicoles réalisés dans les plantations utilisaient le glyphosate (Mihajlovich et al., 2004).

Mode d'action et toxicité

33 Le glyphosate (N-phosphonométhylglycine), un inhibiteur compétitif, bloque une enzyme spécifique à la plante, la 3-énolpyruvylshikimate-5-phosphate synthase (Voet et Voet 1998). Il perturbe ainsi certaines voies métaboliques propres aux végétaux, dont la synthèse des acides aminés aromatiques (Harzler, 2001). Le glyphosate est donc un phytocide non-sélectif, systémique et post-émergeant (Franz et al., 1997). Généralement, on le retrouve sous la forme d'un sel couplé à l'isopropylamine, un surfactant facilitant son transport à travers la cuticule végétale (Relyea, 2005). Ce surfactant a aussi la particularité de restreindre la mobilité de la molécule dans l'écosystème. Plusieurs études de toxicologie démontrent que le glyphosate, à cause de son mode d'action particulier, est hautement toxique pour les plantes et largement non-toxique pour les animaux (William et al., 2000, Tatum, 2004). De plus, il n'existe aucune évidence que le glyphosate possède des propriétés de neurotoxicité, d'immunotoxicité et de perturbateur endocrinien (SERA 2002). En fait le glyphosate est l'une des substances chimiques les mieux caractérisées aujourd'hui et il existe même des informations toxicologiques pour les métabolites issus de cette substance (William et al., 2000)

34 Cependant, il existe une forte controverse à savoir si les formulations commerciales du glyphosate, comme le Roundup^{MD}, sont potentiellement plus toxiques que l'ingrédient actif seul. À cet effet, des études en laboratoire montrent par exemple que le Roundup^{MD} est plus toxique au niveau des érythrocytes (Pieniazek, et al., 2004) et au niveau de la respiration mitochondriale (Peixoto, 2005) que le glyphosate seul. Néanmoins, bien que ces études aient démontré la toxicité accrue du Roundup^{MD}, elles ne sont pas représentatives de réels scénarios d'exposition. William et al. (2000) ont d'ailleurs démontré que le Roundup^{MD} n'a aucun effet négatif sur le développement, sur le système reproducteur et sur le système endocrinien. Selon ces auteurs, le Roundup^{MD} ne présente donc aucun risque pour la santé humaine et celle des mammifères lorsqu'il est utilisé adéquatement. Par souci préventif, il serait quand même prudent de mettre en place des études *in situ* tant en milieux agricoles que sylvicoles afin de comparer, au niveau des impacts environnementaux, les formulations commerciales du glyphosate à la substance active seule. Enfin, il est important de faire la distinction entre les usages agricoles et sylvicoles d'herbicides. En sylviculture, la période critique d'utilisation d'herbicides se situe généralement pendant les deux premières années suivant l'établissement des semis (Balandier et al., 2005) mais elle peut s'étirer sur quelques années en présence d'une compétition végétale féroce. Sommes toute, dans la majeure partie des cas rencontrés en foresterie, l'application d'herbicides survient une à deux fois pour toute la durée de la rotation alors qu'en agriculture intensive cette application est réalisée au moins une fois l'an et à chaque année. Les impacts environnementaux découlant de chacun de ces usages sont donc bien différents. Bien que l'utilisation sylvicole d'herbicides mène à de plus faibles impacts qu'en agriculture, l'application de ces substances doit être adéquatement surveillée et faire l'objet d'un suivi environnemental afin de s'assurer que leur présence en milieux naturels ne gêne pas l'intégrité des écosystèmes.

35 Au niveau de sa dispersion dans l'environnement, le glyphosate présente des qualités intéressantes lorsque utilisé avec un surfactant approprié. Fortement retenu par le sol et donc peu lessivé, ce sont les microorganismes qui dégradent

la majeure partie du glyphosate non absorbé par les plantes (Kools et al., 2005). Les pertes au niveau de la photodécomposition et/ou volatilisation semblent négligeables (Couture et al., 1995; Malik et Kishore, 1989). Par ailleurs, plusieurs chercheurs travaillent déjà depuis plus d'une vingtaine d'années afin d'optimiser les processus d'utilisation du glyphosate dans les aires de reboisement afin d'en réduire davantage les impacts sur les écosystèmes (Thompson et Pitt, 2003). Le tableau 1 résume brièvement les caractéristiques ainsi que les impacts environnementaux connus du glyphosate selon les composantes physiques, biologiques et sociales étudiées.

Impacts sur la composition de la communauté végétale et faunique

36 Au niveau des l'impacts sur la végétation et la faune en forêt, on observe habituellement un changement temporaire dans la composition et l'abondance des espèces végétales suite à un traitement au glyphosate (Micheal et Hermy, 2002). L'effet majeur se fait évidemment sentir les premières années du traitement où, selon la proportion de la superficie traitée, une majeure partie de la végétation est supprimée. Par ailleurs, le changement de composition de végétation suite à l'application du glyphosate, bien qu'il soit éphémère, peut provoquer des impacts indirects sur la faune. Par exemple, chez les gros mammifères, l'application de glyphosate sur des terrains forestiers a comme conséquence une diminution à court terme de la disponibilité en nourriture. La diversité et la densité des populations de petits mammifères sont cependant peu affectées par ce type de traitement. Du côté des invertébrés et des oiseaux, les impacts indirects peuvent être positifs ou négatifs dépendamment de l'espèce étudiée. Le tableau 2 résume les nombreux travaux réalisés à ce sujet. Globalement, on remarque donc que les effets négatifs indirects sur la faune ont plutôt lieu dans les 3 années qui suivent le traitement, alors qu'à plus long terme ces impacts tendent à s'estomper. Enfin au niveau microscopique, les communautés bactériennes et fongiques semblent très peu affectées par l'épandage de glyphosate en milieu forestier (Houston et al, 1998; Stratton et Stewart, 1992). Il faut noter ici que la comparaison du traitement du glyphosate s'est généralement faite avec un site contrôle où la végétation n'était traitée d'aucune façon Ceci suggère que les différences seraient encore moindres si les comparaisons étaient faites avec des sites traités mécaniquement.

37 Les impacts environnementaux des herbicides sont normalement directement reliés à la proportion de la surface forestière qui est traitée. On peut donc réduire les impacts en limitant son utilisation à la partie directement adjacente à l'arbre planté. En effet, quelques études montrent qu'un traitement localisé à la base du plant par épandage terrestre est tout aussi efficace, après un an, qu'un épandage sur toute la superficie de reboisement (Coll et al., 2005; Richardson et al. 2005). En minimisant ainsi la surface traitée, on minimise les impacts sur la composition de la végétation et indirectement sur la faune. Par ailleurs, cette utilisation locale d'herbicides permet de créer deux dynamiques de végétation décalées dans le temps, ce qui diversifie les habitats et par conséquent les espèces fauniques.

38 C'est dans ce contexte que l'usage de certains herbicides est toléré par les organismes de certification qui prône une foresterie durable et responsable tels que le Forest Stewardship Council (FSC), un des plus importants organismes

internationaux de certification forestière. Selon le FSC, la gestion forestière doit promouvoir le développement et l'adoption de techniques non chimiques et à faibles impacts environnementaux pour gérer la végétation accompagnatrice ou tout autre forme de peste. Il n'en demeure pas moins que l'utilisation d'herbicide est considérée acceptable par le FSC si les gains environnementaux d'un tel usage sont clairement démontrés (FSC, 2005).

Tableau 1. Évaluation des impacts de l'utilisation du glyphosate dans les aires de reboisement

Compensate	Caractéristiques	Références
Physique	<ul style="list-style-type: none"> - non volatil, peu de phéno-lyse/composition - relativement insoluble dans le sol - rapidement transformé puis dégradé par les microorganismes du sol - demi-vie inférieure à 60 jours - généralement non détecté après 12-15 mois suite à son application - généralement peu toxique - dégradé plus lentement dans les sédiments 	Dufour, 1991 Dufour, 1991 Malik et al., 1980 Pang et Thompson, 1990 Couture et al., 1995 US EPA, 1990 Couture et al., 1995
Biologique	<ul style="list-style-type: none"> - principalement absorbé par le feuillage des plantes - risque de toxicité directe faible chez les animaux - aucune évidence de neurotoxicité, d'immunotoxicité et non perturbateur du système endocrinien - pas de bioaccumulation - pratiquement non toxique pour une absorption cutanée - dans le contexte forestier québécois, présente peu risque pour la faune - risques d'innocuité ou associés aux additifs, aux impuretés et aux métabolites sont faibles - un changement dans la composition des espèces végétales est observé suivant un traitement - à moyen terme, la composition végétale revient à la normale - des effets indirects sur la faune (habitats, nourriture) sont observés à court terme (jusqu'à 3 ans) - à moyen terme l'augmentation du bois et du couvert favorise les communautés aviaires et les primates/mammifères 	Couture et al., 1995 Tam, 2004 SEPA, 2002 Malik et al., 1980 Couture et al., 1995 Couture et al., 1995 Couture et al., 1995 Couture et al., 1995 Couture et al., 1995 Malin et Hermy, 2002 Lautenschlager et Sullivan, 2002 Voir tableau 2 Voir tableau 2
Sociale	<ul style="list-style-type: none"> - Risque pour les travailleurs est faible - Risque d'immersion de la population, selon le scénario de pire cas réaliste, demeure faible - Inquiétude et opposition de la population 	Lavy et al., 1992 Couture et al., 1995 Wagner, 1994

(d'après Lautenschlager et Sullivan, 2000 ; Couture et al., 1995)

Tableau 2a. Effets indirects observés sur la faune suite à la pulvérisation de glyphosate en milieu forestier

Thème de l'étude	Observations et conclusions	Références
Oiseaux	Le traitement entraîne un changement de végétation et d'habitats qui peut être positif ou négatif dépendant de l'espèce.	
Effet à court terme	Densité totale réduite significativement par les traitements de dégageant des conifères	Lautenschlager, 1991 (Maine, E-U)
	Densité réduite chez la plupart des espèces nichées, l'année du traitement. L'année suivante on retrouve une densité similaire à avant le traitement.	Macdonald et Pinedon, 1993 (Nouvelle-Écosse, Canada)
	Pas de différence dans la densité globale de la communauté aviaire entre le secteur traité et le contrôle.	Morrison et Melow, 1984 (Oregon, E-U)
	Densité totale moindre dans les secteurs traités pour les trois années suivant le traitement.	Scatillo et al., 1989 (Maine, E-U)
Effets à moyen terme	Profil de la communauté aviaire pas affecté un an suivant le traitement dans une espèce à besoins joints	Déry et al., 1994 (Québec, Canada)
	Pas de différences significatives dans l'incidence de prédation sur les œufs entre secteur traité et le contrôle.	
Petits mammifères	L'abondance relative des espèces diffère 2-5 ans après le traitement à cause du changement dans la structure de végétation entre secteur traité et le contrôle.	Milne et Tymora, 1990 (Nouvelle-Écosse, Canada)
	Augmentation significative de la densité de plusieurs espèces 7-9 ans après le traitement des sites modifiés par le feu.	Hardy et Desgranges, 1990 (Québec, Canada)
Effet à long terme	La diversité et la densité des populations semblent peu affectées par un traitement au glyphosate en milieu forestier.	
	Diversité, abondance et biomasse des populations augmentent 1 an après l'année du traitement, 2 ans après le traitement, restent aux mêmes valeurs qu'à avant le traitement.	Anthony et Morrison, 1985 dans Lautenschlager, 1993 (Oregon, E-U)
	2 mois après le traitement pas de changement dans les populations, seul le campagnol à dos noir a été moins abondant un an après le traitement.	D'Amico et al., 1987 (Maine, E-U)
	Densité réduite pour le campagnol à dos noir, 1 an après traitement, inversément les petits mammifères fréquemment retrouvés sur ces sites (ex. : souris sylvestre) sont augmentés.	Lautenschlager, 1991 (Maine, E-U)
	Seuls les sites plus abondants dans les zones non traitées, la densité des souris est identique pour le contrôle et la zone traitée.	Ritchie et al., 1987 dans Lautenschlager, 1993
Aucun effet négatif sur la reproduction, la croissance et la survie de la souris sylvestre, 1 an après le traitement.	Sullivan et Sullivan, 1991 dans Lautenschlager, 1993 (Colombie-Britannique, Canada)	
Peu de changements au sein des populations un an après traitement, faible augmentation ou diminution de certaines populations.	Déry et al., 1994 (Québec, Canada)	

(d'après Lautenschlager et Sullivan, 2000 ; Couture et al., 1995)

Tableau 2b. Effets indirects observés sur la faune suite à la pulvérisation de glyphosate en milieu forestier

Thème de l'étude	Observations et conclusions	Références
Petits mammifères Effet à court terme	Peu de changements au sein des populations un an après traitement, faible augmentation ou diminution de certaines populations. Diversité et richesse semblable à un site non traité. Pendant les deux ans qui suivent le traitement, les populations de souris sylvestre présentent un ratio de sexe, un poids corporel moyen, un taux de reproduction et de survie similaire comparable au contrôle. Populations de souris sylvestre décroissent dans les deux mois qui suivent le traitement sur le site contrôlé mais elles ne sont pas affectées sur l'autre site. Populations de visons (tamias) pas affectées par le traitement. Rien n'indique une diminution de diversité après un traitement.	Cough, 1987 dans Lautenschlager, 1993 (Maine, E.-U.) Runciman et Sullivan, 1996 (Colombie-Britannique, Canada) Sullivan et Boutang, 1996 (Colombie-Britannique, Canada) Cala et al., 1993 (Oregon, E.-U.) Lautenschlager, 1995 (Ontario, Canada)
Effet à court et moyen terme	Taux de capture similaires pour 6 espèces entre la zone traitée et la contrôle pendant les deux ans suivant l'épandage. Aucun traitement n'a semblé affecter l'abondance des souris sylvestres. Pour le vison (tamias) l'abondance diminue tant pour un traitement mécanique que chimique. Moins de captures dans les zones traitées pendant les 3 premières années possiblement dû à la diminution de nourriture et d'habitat. Composition des espèces pas affectée les 3 années suivant le traitement. Populations de certaines espèces sont affectées durant les 2 premières années, mais 3 à 4 ans après les populations reviennent à l'équilibre. Augmentation de la souris sylvestre 2-3 ans après le traitement et diminution du campagnol à dos roux de Gapper les 3 premières années après l'application. Diversité des communautés de plantes et de petits mammifères a été conservée à l'échelle du paysage suite au traitement. La dynamique des populations de mammifères a aussi été conservée.	Sacchi et al. 1989 dans Lautenschlager, 1993 (Maine, E.-U.) Oagné et al., 1990 (Québec, Canada) Lautenschlager et al., 1997b, 1998 McMillan et al., 1990 (Ontario, Canada) Sullivan et al., 1995a et b (Colombie-Britannique) Sullivan et al., 1997 (Colombie-Britannique)
Effet à moyen terme	Reproduction, survie et croissance de la souris sylvestre et du campagnol d'Oregon n'ont pas changé suite au traitement. La richesse de ces espèces n'a pas changé alors que la diversité a varié un peu. Richesse et densité globale semblable pour une forêt mature, une régénération naturelle et une plantation de conifères traitée ou non.	Milton et Towers, 1990 dans Lautenschlager, 1993 (Nouvelle-Écosse, Canada)

(d'après Lautenschlager et Sullivan, 2000 ; Couture et al., 1995)

Tableau 2c. Effets indirects observés sur la faune suite à la pulvérisation de glyphosate en milieu forestier

40

Thème de l'étude	Observations et conclusions	Références
Grands mammifères Effets à court terme	L'utilisation du territoire tend à être réduite les 3 années suivant le traitement au glyphosate et revient à la normale à moyen terme. Cerf à queue noir : aucune aversion à consommer de la végétation traitée au glyphosate. Cerf à queue noir : aucune aversion à brouter la végétation traitée sauf pour des concentrations phytotoxiques de 2,4 et 4,5 kg/ha. Cerf à queue noir : un an suivant le traitement, aucune réduction de l'utilisation du secteur traité est observée.	Sullivan et Sullivan, 1979 (Colombie-Britannique) Campbell et al. 1981 (Oregon, E.-U.) Sullivan, 1985 (Colombie-Britannique) Kelly, 1993 (Ontario, Canada)
Effets à court et moyen terme	Original : broutage hivernal diminue dans les secteurs traités (diminution de la végétation à cause du glyphosate), mais déplacement normal est quand même observé dans ces zones. Original : diminution du trou de chenille de 5 à 41% pour un épandage sériel de 1.07 kg/ha et de 63 à 92% pour une quantité de 2.7 kg/ha. Original : aucune différence significative sur l'utilisation hivernale de cerneaux traités 7 et 10 mois après, mais après 31 et 43 mois, présence pour secteur non traité. Original : préférence des zones non traitées durant les 3 années qui suivent le traitement.	Cumming, 1989 (Ontario, Canada) Connor et McMillan, 1990 (Ontario, Canada) Lloyd, 1989, 1990 dans Lautenschlager, 1993 (Colombie-Britannique) Connor, 1992 (Ontario, Canada)
Effet à moyen terme	Original : application aérienne modifie l'utilisation du territoire, cette tendance est observable même après trois ans. Original : utilisation du territoire diminue la première et la troisième année suivant le traitement. Original : réduction de la disponibilité du trou pour plus de trois ans. Cerf de Virginie : l'utilisation du secteur traité demeure inchangée ou elle augmente l'année suivant le traitement. Original : utilisation du territoire plus élevée que le contrôle de 7-11 ans après alors qu'elle était moindre les 2 premières années. Lièvre : utilisation du territoire diminue la première année, mais revient à la normale pour les années suivantes. Original : utilisation du territoire traitée moins importante pour 8 des 9 ans de l'étude. Original : biomasse disponible est réduite significativement pour les 2 ans suivant le traitement. 7-11 ans après la biomasse disponible augmente de 4-5 fois. Chevreuil : 4-5 ans après le traitement les chevreuils ne distinguent plus l'aire traitée du contrôle. Chevreuil : 7-10 ans après le traitement, les données suggèrent que la disponibilité du trou est peu affectée par un traitement.	Hjeljord et Gronvold, 1988 dans Lautenschlager, 1993 (Norvège) Lautenschlager, 1991 (Maine, E.-U.) Eichholz et al., 1996 (Maine, E.-U.) Hjeljord, 1994 ref? (Norvège) Raymond et al., 1996 (Maine, E.-U.) Triche et al., 1987 (France) Vreeland et al., 1998 (Maine, E.-U.) Eichholz et al., 1992 dans Lautenschlager, 1993

(d'après Lautenschlager et Sullivan, 2000 ; Couture et al., 1995)

Tableau 2d. Effets indirects observés sur la faune suite à la pulvérisation de glyphosate en milieu forestier

41

Thème de l'étude	Observations et conclusions	Références
Gros mammifères Effets à moyen terme	Original Après 7-10 ans, les secteurs traités tendent à être plus utilisés que le contrôle	(Mann, B.-U., Laurischlager, 1992 (Ottawia, Canada)
	Original Après traitement, on retrouve plus de bœufs dans l'aire traitée par rapport au contrôle	
	La quantité potentielle de proies digestibles est plus élevée sur le site traité 6 ans après.	Cummings et al., 1990 (Ottawia, Canada)
Insectes :	La densité et diversité de certaines espèces peuvent être modifiées par un traitement au glyphosate en milieu forestier.	Dubois et al., 1999 (Ottawia, Canada)
Effets à court terme	3 ans après le traitement plus grande diversité dans l'aire traitée au glyphosate. Diminution de la population de charbon pas affectée par le traitement	Gagné et al., 1999 (Québec, Canada)
	Abondance des arthropodes pas affectée de manière significative par le traitement, mais une variation entre arthropodes terrestres et foliaires est observée dans le temps.	Przyto et al., 1999 (Ottawia, Canada)
	1 et 3 ans après le traitement, l'activité de surface des gastropodes se fait plus facilement la normale dans les aires de coupe que dans les aires d'épandage.	Ward et al., 1993 (Ottawia, Canada)
	Dans tous les espèces récoltées, l'homoptère est le seul qui présente une densité plus faible dans le secteur traité	Hartman et al., 1997 (Ottawia, Canada)
Effets à moyen terme	Densité des gastropodes est plus élevée dans une plantation d'épinette de 9 ans traitée que dans une forêt mature de 70 ans et la diversité spécifique est plus élevée	
Amphibiens et reptiles	Pour les deux années suivant le traitement, pas de changement dans les populations des deux espèces de grenouille les plus communes dans cette zone	Bogart, et al., 1991 (Ottawia, Canada)
Effets à court terme	Certains développements anormaux sont observés chez la grenouille des bois (dans les aires traitées) dans les quatre zones traitées au glyphosate (dans les deux ans suivant l'épandage). Ces anomalies semblent cependant revenir à une fréquence négligeable	Laurischlager et al., 1996 (Ottawia, Canada)

(d'après Thorpe, 1996; Balandier et al. 2005 ; Kabzems, 1996; Schütz 2004; Provendier et Balandier 2004; Newsome, 1996; Fiddler et McDonald, 1996; Green et al. 2003; Vandenbroucke et al, 2005).

Les alternatives aux herbicides et leurs impacts sur l'environnement

- 42 Il existe plusieurs alternatives à l'utilisation d'herbicides pour gérer la végétation accompagnatrice en milieu forestier. Cependant, ces alternatives demeurent moins populaires en raison de leur ratio coût/efficacité relativement élevé par rapport aux herbicides. En effet, malgré que l'aspect économique soit un obstacle de taille à la mise en marché des alternatives, les considérations environnementales réelles ou perçues poussent souvent les gens à développer et utiliser ces techniques pour dégager les plantations (Richardson et al., 2002). Hormis le fait qu'il y ait un intérêt grandissant pour les alternatives, nous pouvons constater qu'il existe peu d'études documentant les impacts environnementaux indirects associés à leurs usages. Dans cette section les différentes alternatives à l'utilisation des herbicides seront brièvement décrites. Le tableau 3 offre un résumé des principales caractéristiques de ces diverses méthodes présentement disponibles.

Traitements mécaniques

- 43 La méthode la plus couramment employée pour remplacer les herbicides est le dégagement mécanique (manuel ou motorisé) des plantations et la préparation mécanique du site de reboisement. Ces opérations mécaniques sont d'une efficacité très variable selon le type d'écosystème et leur succès dépend très fortement du type de végétation qui est visé (Balandier et al., 2005). Des études réalisées au Québec depuis plus de 15 ans démontrent que des gains de croissances significatifs chez l'épinette noire sont obtenus 5 ans et 10 ans suivant un traitement mécanique manuel singulier ou répété (Jobidon et Charette, 1997; Jobidon et al., 1999). À l'inverse, on constate que dans les plantations de peupliers hybrides du sud du Québec, les opérations mécaniques motorisées sont inefficaces pour maîtriser la végétation accompagnatrice (Coll et al., 2005). Il s'avère donc nécessaire de bien différencier entre les diverses méthodes

Dans le contexte de la maîtrise de la végétation compétitrice, l'utilisation des plantes de couverture vise à restreindre le développement des plantes à fort pouvoir concurrentiel par l'établissement d'espèces mieux tolérées par les semis comme les céréales. Une telle stratégie de gestion de la végétation compétitrice permet d'augmenter la disponibilité du brout pour les mammifères en plus d'accélérer le renouvellement de la matière organique et d'enrichir le site en nutriments (Thomas et Steen, 1996). Cependant, sur les sites à productivité élevée, certains types d'herbes peuvent entrer en compétition avec les arbres plantés (Negrave et Kabzems, 1996). Le choix des bonnes plantes couvre-sol ainsi que la technique d'installation de ces plantes dans le milieu s'avèrent donc critiques pour que cette pratique soit réellement efficace. Les effets secondaires de ces pratiques, en terme de modification floristique à moyen et long terme doivent aussi être considérés afin d'optimiser les effets positifs des plantes de couverture tout au long de la rotation.

Animaux domestiques

- 48 Une autre alternative d'intérêt est l'abroustissement contrôlé par des animaux domestiques comme le mouton. Des recherches antérieures démontrent que cette stratégie peut être dans certains cas aussi efficace que les herbicides et les traitements mécaniques (Newsome, 1996). Il y a peu d'impacts environnementaux reliés à cette pratique, en plus des bénéfices économiques associés à l'élevage des moutons. Mais, puisque les moutons sont efficaces pour brouter seulement certaines espèces végétales, cette alternative ne peut pas être considéré viable pour tous les types d'écosystèmes forestiers (Newsome, 1996). Il faut par ailleurs bien définir l'état de charge toléré par les plantations du fait des dégâts (brout, frottis) que peuvent occasionner les animaux s'ils n'ont pas une quantité de nourriture suffisante.

Paillis

- 49 L'utilisation de paillis couvre sol, de son côté, possède l'avantage d'être efficace pour contrôler toutes les communautés de plantes (McDonald et Fiddler, 1996). En plus de maîtriser la végétation accompagnatrice pendant assez longtemps, le paillis permet aussi de conserver l'humidité à la base des plants (McDonald et Fiddler, 1996). Cependant, certains matériaux comme les copeaux de bois, ont un effet nuisible sur les plants qui ils peuvent causer une diminution de température et du contenu en oxygène dans le milieu (Greenly et Rakow, 1995). Cette stratégie est malgré tout très prometteuse à cause de sa très haute efficacité et de ces faibles impacts sur l'environnement, mais son coût relativement élevé par rapport aux autres alternatives restreint son utilisation (Fiddler et McDonald, 1996; Green et al. 2003). Par ailleurs, des impacts environnementaux négatifs pourraient être associés à l'utilisation de paillis non biodégradables, comme ceux en plastique, car ces derniers peuvent séjourner de nombreuses années dans le sol avant d'être récupérés.

Composés naturels

- 50 Certaines autres alternatives s'appuient sur le même principe que les

mécaniques de gestion de la végétation compétitrice.

44 En effet, le traitement mécanisé manuel reste très efficace pour la maîtrise de la végétation accompagnatrice lorsqu'il s'agit d'une compétition pour la lumière (Thiffault et al., 2003) en plus de présenter des impacts environnementaux relativement faibles. Cette option demeure donc totalement justifiée dans les aires de reboisement destinées à la croissance d'essences résineuses. Or, dans le contexte d'une gestion forestière plus intensive, comme les plantations d'essences à forte croissance, c'est un dégagement réalisé à l'aide d'un tracteur forestier qui est souvent utilisé bien qu'il ne présente pas une efficacité comparable aux opérations mécaniques manuelles. De plus, les traitements motorisés causent des impacts environnementaux plus prononcés en perturbant le sol. On peut attribuer le manque d'efficacité au fait que le tracteur laisse une aire de végétation non traitée en périphérie du plant ce qui rehausse la compétition. Face à une végétation composée majoritairement de graminées, des espèces fort compétitives au niveau des ressources du sol, cet espace non traité est suffisant pour gêner la croissance de l'arbre (Thomas et al., 2000 ; Coll et al., 2005). Enfin, certaines de ces espèces de graminées peuvent repousser vigoureusement suite au dégagement motorisé, ce qui fait en sorte que la compétition peut se retrouver accentuée. En résumé, pour que les traitements mécaniques soient efficaces, il faut choisir le bon traitement et posséder une bonne connaissance de l'évolution des complexes végétaux au fil des années afin d'intervenir au bon moment (Bedford et Mackinnon, 1996).

45 Actuellement, les méthodes mécaniques sont perçues comme ayant des impacts environnementaux plus faibles que les herbicides (Dubois, 2002), bien que très peu d'études rigoureuses ont été faites sur les impacts environnementaux directs et indirects de telles pratiques (Micheal et Hermy, 2002). Ainsi, on ne connaît pas les quantités de monoxyde de carbone qui sont émises par la machinerie utilisée, les quantités d'huile et de diesel qui peuvent se retrouver dans le sol, l'impact de la compaction du sol (dû à la circulation de la machinerie) sur la productivité à long terme de l'écosystème (Kabzems, 1996), l'impact du bruit sur la faune (Radle, 2005) et les effets à long-terme sur la dynamique de la végétation des sous-bois. A l'inverse des études sur les herbicides, les effets des interventions mécaniques sur les modifications de la flore et de la faune (changements dans les habitats, les sources alimentaires, etc.) sont très peu documentés.

46 Enfin, vu la complexité des interactions qui régit la dynamique des écosystèmes forestiers, il est difficile d'évaluer, surtout à long terme, les impacts environnementaux à l'échelle du paysage à l'aide des différents outils disponibles (Micheal et Hermy, 2002). Par exemple, plusieurs chercheurs ont montré l'inadéquation des indices de diversité traditionnels pour comparer l'impact des traitements chimiques et mécaniques (Micheal et Hermy, 2002). L'efficacité d'un traitement et ces impacts sur l'environnement doivent donc être quantifiés à plusieurs moments au cours du cycle de croissance du peuplement forestier et cela à différentes échelles spatiales afin d'obtenir une vue d'ensemble complète des différents traitements utilisés (Comeau et al, 1996).

Plantes de couverture

47 L'introduction de plantes couvre-sol, comme des céréales ou des légumineuses, est une technique utilisée depuis bien longtemps aussi bien en Nouvelle-Zélande qu'en Europe (Frochot et al, 2002; Schütz 2004; Provendier et Balandier 2004).

herbicides, soit l'utilisation d'une substance phyto toxique. Des composés naturels comme l'huile essentielle de citronnelle ont déjà été étudiés pour remplacer les herbicides synthétiques. Cependant lorsque l'on compare la quantité de citronnelle (500 kg/ha) nécessaire pour contrôler la végétation versus celle de glyphosate (environ 1 kg/ha), il est légitime de se demander si cette substance naturelle est sécuritaire pour l'environnement (Micheal et Hermy, 2002). Il faut aussi prendre en compte les impacts environnementaux qu'occasionnera la culture de la plante dont on veut extraire le composé naturel pour avoir un bilan global des impacts (Micheal et Hermy, 2002). Les composés naturels demeurent toutefois une alternatives très prometteuse à cause de l'immense diversité qui existe en matière de phytotoxines (Duke et al., 2000).

Champignons

51 Mis à part les composés naturels, certains organismes pathogènes présentent d'intéressantes qualités comme substance herbicide. C'est notamment le cas du champignon *Chondrosterum purpureum*. Homologué en 2002 par l'Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (ARLA), la pâte Myco-Tech^{MD} (nom donné au produit commercial) a été développée, en partie, au Québec par la corporation Myco-Forestis. Cette nouvelle technologie semble prometteuse comme moyen pour contrôler la végétation de feuillus, car aucun impact environnemental négatif n'a été associé à son utilisation (Vanderbroucke et al., 2005). Néanmoins, on peut se questionner sur la mobilité du champignon et du risque qu'il devienne un parasite à contrôler. En principe, son application ne présente aucun risque pour la santé humaine et plusieurs avantages directs et indirects sont associés à son usage (Vanderbroucke et al., 2005). Ce produit a été homologué par l'ARLA, un organisme fédéral canadien, mais non pas par le Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec (MRNF) qui exige de continuer les tests pendant encore au moins 7 ans.

Bénéfices et inconvénients potentiels des traitements chimiques vs. les méthodes alternatives

52 Comme nous l'avons vu précédemment, les deux stratégies de gestion de la végétation accompagnatrice les plus utilisées sont les traitements chimiques et mécaniques. Les traitements chimiques sont d'abord choisis à cause de leur excellent ratio coût/efficacité. En effet, selon les recherches que nous avons faites, aucune étude réalisée sur les alternatives n'est parvenue à démontrer qu'il est possible d'obtenir une efficacité comparable aux traitements chimiques à un coût aussi peu élevé. D'un point de vue environnemental, l'utilisation d'herbicides semble poser quelques problèmes puisqu'ils modifient la structure et composition de la végétation pendant quelques années, ce qui a des répercussions sur la faune. Toutefois, les méthodes alternatives modifient également le milieu végétal pendant quelques années. L'obstacle majeur de l'utilisation des herbicides en milieu forestier demeure donc la perception très négative du public à son égard.

Tableau 3. Tableau comparatif des alternatives et des traitements chimiques au