UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

L'AMÉNAGEMENT INÉQUIEN EN FORÊT BORÉALE : QUE PEUT-ON APPRENDRE DE LA SYLVICULTURE DES PEUPLEMENTS CONIFÉRIENS AILLEURS QU'AU CANADA

RAPPORT DE SYNTHÈSE ENVIRONNEMENTALE

PRÉSENTÉ

COMME ÉXIGENCE PARTIELLE

DU DOCTORAT EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

HERVÉ BESCOND
FÉVRIER 2005

TABLE DES MATIÈRES

TABLES DES MATIÈRES……..ii

LISTE DES FIGURES……..……...iv

LISTE DES TABLEAUX……v

RÉSUMÉ…….…….vi

INTRODUCTION…….1

1. LA SYLVICULTURE ET LES SYSTÈMES SYLVICOLES……..5

1.1. LES GRANDES ÉTAPES DANS LE DÉVELOPPEMENT DE LA SYLVICULTURE…….5

1.2. LES PRINCIPAUX SYSTÈMES SYLVICOLES……..7

1.2.1. SYSTÈMES SYLVICOLES PRODUISANT DES FUTAIES…9

1.2.1.1 SYSTÈME SYLVICOLE DE LA COUPE RASE…….9

1.2.1.2 SYSTÈME SYLVICOLE DE LA COUPE D'ENSEMENCEMENT……..10

1.2.1.3 SYSTÈME DE LA COUPE PROGRESSIVE…….11

1.2.1.4 LE JARDINAGE……..12

1.2.1.5 LA FUTAIE IRRÉGULIÈRE PAR PIEDS D'ARBRES……..14

1.2.2. SYSTÈMES SYLVICOLES PRODUISANT DES TAILLIS...14

1.2.2.1 LE TAILLIS…….14

1.2.2.2 LE TAILLIS SOUS FUTAIE……...15

2. DIFFÉRENTS TYPES DE STRUCTURES IRRÉGULIÈRES……..15

3. LA CONVERSION DES PEUPLEMENTS RÉGULIERS EN PEUPLEMENTS IRRÉGULIERS……...18

4. INFLUENCE SUR LA RÉGÉNÉRATION……22

5. INFLUENCE SUR LA CROISSANCE……..23

6. DÉBRIS LIGNEUX ET ARBRES MORTS……...24

7. UTILISATION DE MODÈLES……..25

8. IMPACTS ÉCONOMIQUES……..27

CONCLUSION……29

BIBLIOGRAPHIE……...32

ANNEXES……...39

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1 Aire de répartition de la forêt boréale (Hare et Ritchie, 1972)……..1

Figure 2 Classification des systèmes sylvicoles selon Kerr (1999).....…...9

Figure 3 Distribution diamétrale et profil schématique de différents peuplements d'après Lähde *et al.* (1999) et Baker *et al.* (1996)……...17

Figure 4 Représentation schématique des décisions sylvicoles en phase de conversion conduisant à différents modes de conversion issue de Schütz (1997)……...…21

Figure 5 Dynamique naturelle des peuplements forestiers et sylviculture proposée pour la pessière à mousse et la sapinière à bouleau blanc de l'ouest du Québec d'après Bergeron *et al.* (1999 et 2002)……...40

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1 Synthèse des arguments pour le passage à l'aménagement inéquien de la pessière noire à mousse et de la sapinière à bouleau blanc……..31

Résumé

Jusqu'à très récemment, l'aménagement forestier de la forêt boréale reposait principalement sur la coupe totale. Au cours des dernières décennies, il a été démontré que ce type d'aménagement ne permet pas de maintenir la diversité biologique et les fonctions écologiques des écosystèmes forestiers boréaux. Une diversification des pratiques forestières a donc été envisagée pour maintenir ou pour créer des peuplements irréguliers dans les mosaïques forestières qui résultent de l'aménagement forestier. Cependant, il n'existe pas d'exemples suffisamment anciens pour déterminer s'il est réellement possible de réaliser un aménagement inéquien de la forêt boréale québécoise. Il peut donc être intéressant d'étudier la sylviculture des peuplements de conifères dans d'autres pays, notamment en Europe et aux États-Unis, où la sylviculture des peuplements de conifères a été documentée depuis plus de cents ans. L'expérience acquise, par les sylviculteurs de ces pays, dans l'aménagement des peuplements de conifères pourrait fournir un enseignement très utile lors de la mise en pratique des concepts d'aménagement forestier durable pour la forêt boréale québécoise. Il sera cependant nécessaire de créer de nouvelles normes, adaptées aux essences locales ainsi qu'aux conditions climatiques et de stations. Ces normes devront également intégrer des objectifs de maintien des fonctions écologiques et de la diversité biologique propre à la forêt boréale québécoise, notamment par la création ou le maintien de chicots et de débris ligneux dans les peuplements forestiers.

Introduction

La forêt boréale, appelée Taïga en Russe, est l'un des biomes les plus étendus de la planète (Kimmins et Wein, 1986). Elle forme une bande de végétation de près de 12000 km de long et de plusieurs centaines de kilomètres de large qui ceinture l'hémisphère Nord (Figure 1) (Larsen, 1980 ; Graham et Jain, 1998).

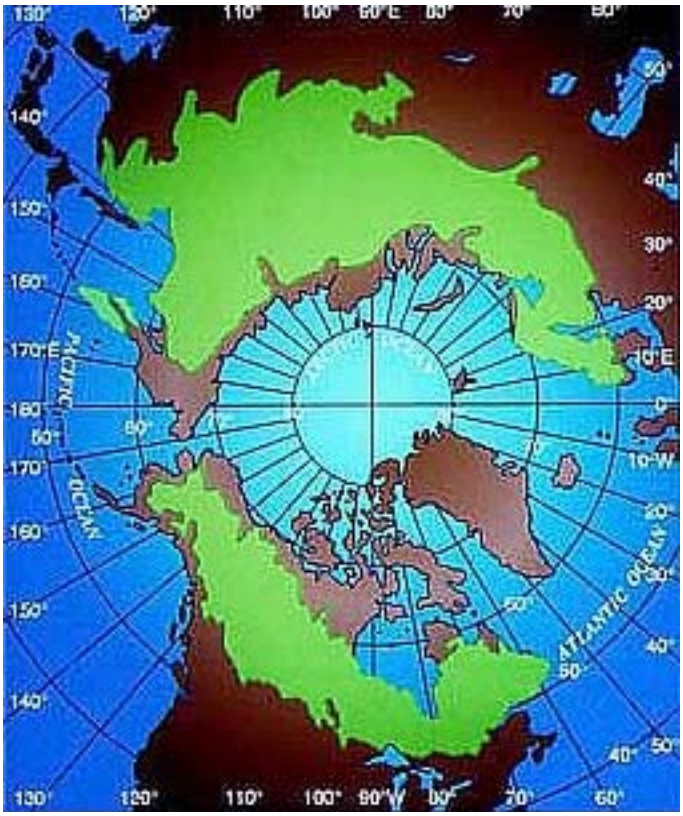


Figure 1 : Aire de répartition de la forêt boréale (Hare et Ritchie, 1972)

Ces forêts représentent près d'un tiers des surfaces boisées de la planète et occupent 1,4 milliards d'hectares (Burton *et al.*, 2003). Près des deux tiers des forêts boréales

sont situés en Russie, l'autre tiers étant réparti entre la Fénnoscandinavie et l'Amérique du Nord. Les forêts boréales se développent sous un climat continental froid, qui connaît de fortes variations saisonnières de température, caractérisé par des hivers longs (6 mois à moins de 0°C) et des étés courts (4 mois à plus de 10°C) (Kimmins et Wein, 1986). Les précipitations annuelles varient de 400 à 1000 mm par an et se produisent principalement sous forme de neige. Il est généralement admis que les températures sont le facteur déterminant de la limite nord de la forêt boréale (Sirois, 1992). Ces forêts, clairsemées ou denses, sont dominées par les conifères (épinettes, pins, sapins, mélèzes) (Kimmins et Wein, 1986 ; Sirois, 1992 ; Burton *et al.*, 2003) qui sont accompagnés de plusieurs espèces de feuillus (peupliers, bouleaux, aulnes, saules). Dans les sous bois on retrouve notamment des Éricacées (bleuets, myrtilles, callunes, bruyères…), des lichens et des mousses. Les différences de croissance des espèces, la composition des peuplements, la longévité des espèces, la tolérance à la lumière, les épidémies d'insectes, et le régime des feux créent une multitude de peuplements forestiers de compositions et de structures différentes (Ryan, 2002 ; Graham et Jain, 1998).

Depuis plusieurs décennies, la coupe totale est le principal système sylvicole utilisé dans la forêt boréale. Cependant, il est reconnu depuis plusieurs années que ce type d'aménagement ne permet pas de maintenir l'ensemble des composantes des écosystèmes forestiers boréaux (Bergeron *et al.*, 1999). L'utilisation de la coupe totale comme système sylvicole dans l'ensemble de la forêt boréale a été basée sur

l'hypothèse que le régime des feux est caractérisé par des feux fréquents qui produisent des peuplements réguliers (Bergeron *et al.*, 2001 ; Bergeron *et al*., 2002) ainsi que par le fait que ce système était économique et efficient pour la récolte de bois (Timoney, 1998 ; McClellan *et al.*, 2000). Il faut cependant faire une distinction importante entre une révolution forestière et un cycle des feux de même durée. En effet, dans le cas d'une révolution forestière, aucun peuplement n'aura un âge dépassant la durée de la révolution alors que dans le cas du cycle des feux, un pourcentage plus ou moins important des peuplements aura un âge dépassant le cycle des feux (Bergeron *et al.*, 2002). Cette proportion varie en fonction de la longueur du cycle des feux. Dans le cas d'un aménagement équien, la distribution des classes d'âge sera donc différente de ce qui est observé dans les mosaïques naturelles (Bergeron *et al.*, 1999). Depuis plusieurs années, on assiste à un intérêt grandissant pour la mise en place d'un aménagement des forêts basé sur la connaissance des perturbations naturelles (Attiwill, 1994 ; Bergeron et Harvey, 1997 ; Lähde *et al.*, 1999 ; Haeussler et Kneeshaw, 2003). En effet, la mise en place d'un aménagement forestier qui favorise le développement des peuplements et d'un paysage d'une composition semblable à ceux qui caractérisent les écosystèmes naturels, devrait permettre le maintien de la diversité biologique et des fonctions écologiques essentielles des écosystèmes (Gauthier et *al.*, 1996 ; Bergeron *et al.*, 1999 ; Mason *et al.*, 1999 ; Kuuluvainen, 2002). Pour atteindre les objectifs d'aménagement forestier durable, différentes solutions sont envisagées. Seymours et Hunter (1999) proposent d'utiliser de révolutions forestières de longueurs différentes dans des proportions

similaires à celles qui sont observées dans les régimes de feux naturels. Cette approche n'est applicable qu'aux peuplements forestiers pour lesquels on retrouve des espèces d'arbres qui peuvent avoir des révolutions commerciales très longues (200 à 300 ans), ce qui n'est pas le cas des espèces de la forêt boréale où cette approche risquerait d'entraîner des pertes de production et d'attribution de possibilité forestière (Bergeron *et al.*, 2002). L'approche envisagée pour l'Ouest du Québec est basée sur l'utilisation de pratiques sylvicoles qui permettraient de maintenir des peuplements de composition et de structure semblable aux vieilles forêts irrégulières dans des forêts aménagées (Annexe 1) (Bergeron *et al.*, 2002). De plus, des études ont démontré que de vieilles coupes partielles pouvaient avoir des effets similaires à la dynamique naturelle des peuplements forestiers. Cependant, ces études ne permettaient généralement pas de quantifier les prélèvements réalisés lors de la récolte (Deal *et al.*, 2002 ; Deal et Tappeiner, 2002 ; Bescond, 2002).

Avant de créer de nouveaux complexes sylvicoles, il est donc nécessaire de réévaluer les avantages et les inconvénients des systèmes sylvicoles existants, ceci découlant du fait qu'en sylviculture l'expérience de longue durée est un atout incomparable (Schütz, 1997). Le choix d'un ou de plusieurs systèmes sylvicoles devra être basé sur la connaissance des besoins des espèces, le potentiel du site, le climat et être liés aux objectifs de l'aménagement (Mason *et al*., 1999).

1. La sylviculture et les systèmes sylvicoles

Schütz (1990) définit la sylviculture comme étant « l'art d'appliquer des techniques fondées sur des bases scientifiques biologiques dans le dessein de contrôler le développement naturel des forêts et de guider leur évolution dans la direction voulue, au bon moment et de façon rationnelle et finalement d'en conserver les forces productrices naturelles ». Les systèmes sylvicoles sont l'ensemble des pratiques sylvicoles, ceux ci incluent les techniques pour l'exploitation et la régénération des forêts permettant d'atteindre les objectifs de composition et de structure des peuplements ainsi que leur développement et leur régénération , de rencontrer différents objectifs incluant les objectifs environnementaux, sociaux et politiques (Matthews, 1989 ; Schütz, 1990 ; Baker *et al*., 1996 , Harvey *et al.*, 2003).

1.1. Les grandes étapes dans le développement de la sylviculture

La réglementation de la récolte du bois et la conceptualisation des premiers systèmes d'aménagement forestier sont apparus en Europe suite une très importante diminution de la ressource forestière et une crainte de voir cette ressource disparaître (Schütz, 1990 ; Weetman, 1996 ; Jacobsen, 2001). En général, la paternité des sciences forestières est attribuée à Henry-Louis Duhamel de Monceau (1700-1782) qui publia six volumes sur l'aménagement forestier entre 1755 et 1764 (Schütz, 1990). Duhamel de Monceau ne fut cependant pas le premier à écrire des ouvrages sur l'aménagement

forestier (Annexe 2). Mais, son œuvre a eu une influence majeure sur l'histoire des sciences forestières. En effet, ses ouvrages furent traduits en allemand à la fin du 18ème siècle et servirent de base au développement de la sylviculture dans le Nord de l'Europe et en particulier en Allemagne (Schütz, 1990). La sylviculture moderne est née en Allemagne avec l'organisation des premiers services forestiers et la création d'écoles de formations à la fin du 18ème siècle, notamment avec sous l'impulsion de Hartig et Cotta (Matthews, 1989, Schütz, 1990). Ceux-ci ont développé une sylviculture ayant pour but la restauration des forêts surexploitées, basée sur le modèle agricole (Schütz, 1990 ; Jacobsen 2001). Ce système, à l'origine de la normalisation des forêts, était basé sur une division de la forêt en peuplements de même âge et de même espèce, ce qui a entraîné la création de hautes futaies de conifères (Schütz, 1990 ; Jacobsen, 2001). Par la suite, ce système de sylviculture basé sur les coupes rases et la monoculture a été largement adopté dans de nombreux pays européens (Schütz, 1990).

Dans la seconde moitié du 19ème siècle, de nouveaux concepts basés sur une meilleure connaissance des stations et des essences, s'opposant également à toute généralisation, vont émerger (Schütz, 1990 ; Jacobsen, 2001). Cependant, ces concepts étaient basés sur la monoculture et les éclaircies, il n'y avait donc pas de différences fondamentales par rapport au système conventionnel. En 1880, Karl Gayer, professeur à l'école forestière de Munich, va proposer l'idée d'une sylviculture proche de la nature basée sur la régénération des forêts et la création de

peuplements mélangés (Schutz, 1990 ; Jacobsen, 2001). Cette idée va fortement influencer le développement de mode de régénération basée sur la coupe progressive dans les Alpes germanophones (Schütz, 1990). À la même époque, on assiste en France à la naissance de l'idée du jardinage qui a notamment été décrite par De Liocourt (1898). À la suite de ces grands courants de pensée, il y a eu en Allemagne, après la première guerre mondiale, un mouvement basé sur une sylviculture proche de la nature notamment par Möller en 1922 (Gamborg et Larsen, 2003). Cette sylviculture appelée Dauerwald, terme que l'on peut traduire par forêt permanente, était fondée sur une description de l'ensemble des éléments composant une forêt et des relations existantes entre ceux-ci (Helliwell, 1997 ; Jacobsen, 2001). En Amérique du Nord, il y a également eu dès le début du 20ème siècle des essais de sylviculture proche de la nature sous l'influence de sylviculteur venus d'Europe (O'Hara, 2002).

1.2. Les principaux systèmes sylvicoles

Il existe différentes catégories de systèmes sylvicoles (Smith *et al.*, 1997 ; Graham et Jain, 1998 ; Lähde et *al.*, 1999), qui sont habituellement groupés selon le mode de régénération et la répartition des coupes dans l'espace et le temps. Smith *et al.* (1997) propose une classification en 6 catégories qui est généralement acceptée en Amérique du Nord :

I . Systèmes sylvicoles produisant des futaies (Peuplements produits à partir de graines)

a. Système sylvicole de la coupe rase
b. Système sylvicole de la coupe d'ensemencement
c. Système sylvicole de la coupe progressive
d. Le jardinage

II. Systèmes sylvicoles produisant des taillis (Peuplements produits à partir de régénération végétative)

a. Système sylvicole du taillis
b. Système sylvicole du taillis sous-futaie

Il existe cependant des nombreuses variations possibles dans chacune des catégories (Smith *et al.*, 1997). La classification de Smith *et al.* (1997) sera utilisée dans ce rapport pour décrire les différents systèmes sylvicoles bien qu'il existe de nombreux autres exemples de classifications des systèmes sylvicoles basés sur la répartition spatiale des interventions sylvicoles, telle que celle développée par Kerr (1999) (Figure 2), ou en fonction de la structure des peuplements (Anonyme, 1995 ; Anonyme, 2002). Le choix du système et des traitements appliqués doit se faire en fonction de l'écologie des espèces qui composent le peuplement, la condition actuelle du peuplement et des objectifs de structure et de composition souhaités (Baker *et al.*, 1996 ; Mason *et al.*, 1999).

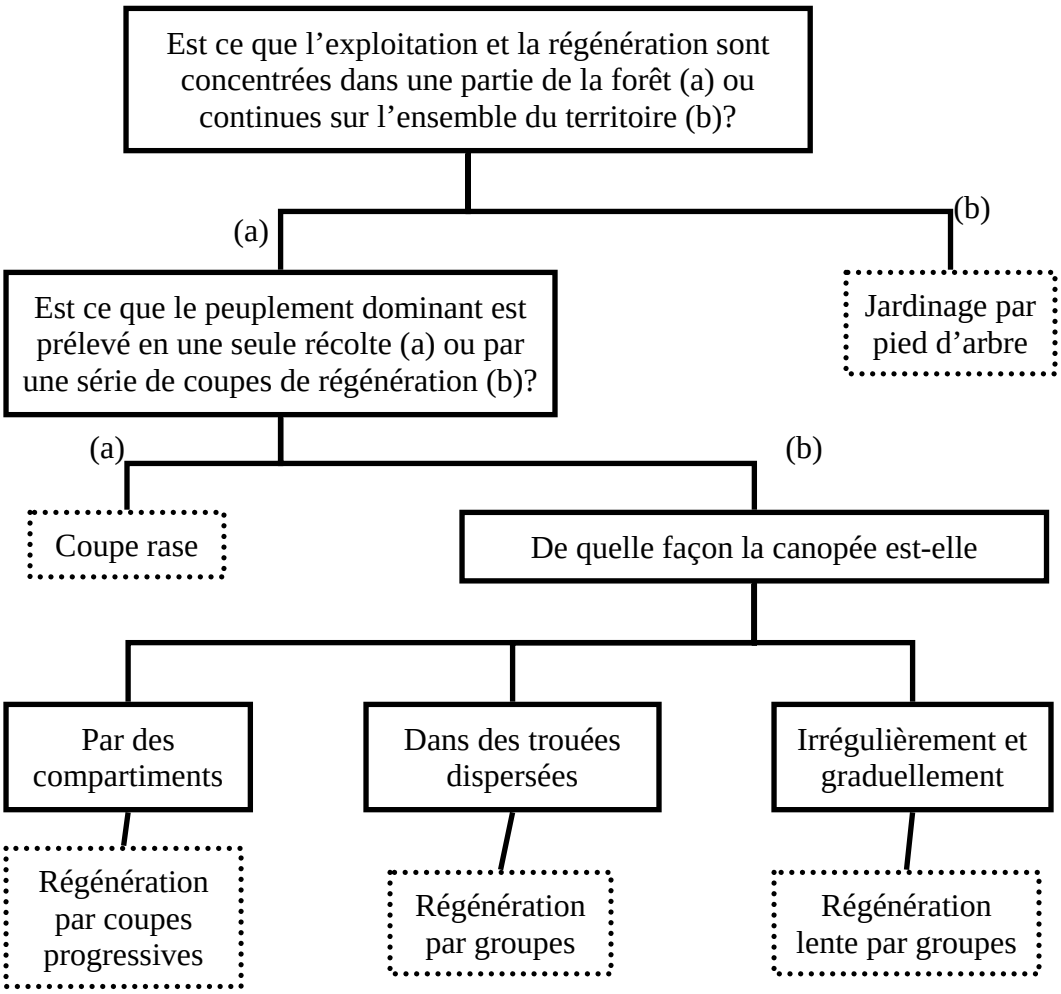


Figure 1 : Classification des systèmes sylvicoles selon Kerr (1999).

1.2.1. Systèmes sylvicoles produisant des futaies

1.2.1.1 Système sylvicole de la coupe rase (Clearcuting method)

Dans ce système sylvicole, tous les arbres sont récoltés en une seule opération (il y a coupe rase lorsque qu'une trouée supérieure à deux fois la hauteur des arbres dominants est crée). Le nouveau peuplement peut être obtenu soit par plantation soit par régénération naturelle. La récolte peut se faire par bloc, peuplement ou bande. Ce système est basé sur la rotation que l'on peut définir comme étant l'intervalle entre deux coupes de reproductions (Baker *et al.*, 1996). La coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS), ainsi que les éclaircie pré-commerciales et les éclaircies commerciales, sont des techniques sylvicoles qui s'inscrivent dans le système sylvicole de la coupe totale. Parmi les principales variations de la coupe totale, la coupe par bande (*Strip cutting*) a pour but de récoler les peuplements sur une périodes de temps relativement courte (moins de 10 ans) en favorisant l'implantation d'une régénération naturelle à partir des arbres matures des bandes résiduelles Les coupes par bloc (*Block cutting*) sont également une variation du système de la coupe totale. Ce type de coupes est réalisé pour des besoins d'aménagement fauniques ou forestiers (chablis, paysages…). Les coupes mosaïques qui sont actuellement réalisées au Québec correspondent à cette variation du système sylvicole de la coupe totale.

1.2.1.2 Système sylvicole de la coupe d'ensemencement (Seed-tree method)

Mode de régénération comportant l'enlèvement du peuplement exploitable en une seule récolte semblable à une coupe totale, à l'exception d'un petit nombres de

semenciers qui ne sont pas récoltés pour une période de temps déterminée, en générale jusqu'à ce que la régénération soit suffisamment abondante. Les arbres conservés sont choisis en fonction de leur phénotype. L'objectif de ce système sylvicole est de créer un peuplement équien. Les variations de ce système sont liées à la disposition des arbres semenciers sur le parterre de coupe. Les arbres peuvent être distribués uniformément sur le parterre de coupe (*Uniform seed tree system*). Alors que dans le cas de la coupe d'ensemencement par groupes (*Group seed tree system*) les arbres semenciers sont conservés dans des petits blocs. La distributions et l'espacement des blocs est liée à la distance de dissémination des graines.

1.2.1.3 Système de la coupe progressive (Shelterwood method)

Dans ce système, les arbres matures sont récoltés en deux récoltes ou plus. Lors de la première opération (coupe d'ensemencement), une partie du peuplement est prélevé afin de promouvoir la capacité de croissance et d'ensemencement des arbres résiduels. Une fois que la régénération est établie, les arbres matures restants sont récoltés. L'objectif principal de ce système est de réaliser un aménagement équien du peuplement, cependant des variations de ce système peuvent créer des peuplements irréguliers. Dans ce système ont peut distinguer différentes variations :

- La coupe progressive d'ensemencement uniforme dans lequel le traitement est réalisé uniformément dans le peuplement par la mise en place de coupes

préparatoires pour l'installation de la régénération, l'expansion du houppier, la production de graines et la résistance au vent.

- La coupe progressive d'ensemencement par bande ou la récolte est faite dans des bandes qui avancent progressivement dans le bloc.

- La coupe progressive d'ensemencement par groupe. La récolte des arbres matures se fait par la création de petites trouées qui sont agrandies progressivement en fonction de l'établissement de la régénération. Ces coupes se poursuivent jusqu'à ce que les trouées crées se rejoignent. Ce système peut créer des peuplements à structures irrégulières.

- La coupe progressive en régénération lente : Dans ce système, les arbres matures sont récoltés progressivement en fonction de leur vigueur, du diamètre qu'ils ont atteint ainsi que du besoin en semence. Plus l'intervalle de temps entre les récoltes sera long, plus la structure du nouveau peuplement sera irrégulière.

1.2.1.4 Le jardinage (Selection method)

Pour Zingg *et al* (1997), le terme de jardinage est souvent associé de façon erronée à la sylviculture proche de la nature, alors que le jardinage est un système intensif

d'aménagement des forêts, dans lequel la production de bois est aussi importante que la protection contre les catastrophes naturelles, la conservation du paysage et des écosystèmes, la fonction de récréation de la forêt, etc…

- Le Jardinage par pied d'arbre (*Single tree selection*) : Ce système diffère des autres systèmes sylvicoles du fait qu'il n'est pas confiné à une partie de la forêt mais qu'il s'applique à l'ensemble de celle-ci (Matthews, 1989). Dans ce système, les peuplements forestiers sont constitués d'un mélange équilibré d'arbres de toutes dimensions et de tous âges, intimement mélangés (Schütz, 1990). La distribution des classes de diamètre de ce type de peuplements correspond à une courbe en J inversé (Figure 2). La récolte s'efforce de maintenir ou d'approcher de cet équilibre en éclairant à un niveau souhaitable les semis et les jeunes plants, en favorisant la croissance des plus beaux arbres par des éclaircies convenables et en récoltant les arbres parvenus aux dimensions d'exploitabilité (Schütz, 1990). Ce système est bien adapté pour les espèces tolérantes à l'ombre (Lieffers et al, 2003). Il est de plus basé sur une structure verticale parfaite et une individualisation de la production (Schütz, 2002).

- Jardinage par groupe : Contrairement au jardinage par pied d'arbre ou seules des petites trouées sont crées favorisant la régénération des espèces intolérantes à l'ombre), ce système crée de plus grande trouées qui permettent

l'installation des espèces intolérantes à l'ombre (Burns, 1983 ; Graham et Jain, 1998). On retrouve donc une juxtaposition de petits peuplements (bouquets) de quelques centaines de mètres carrés, d'âges différents, ou toutes les classes d'âges sont présentes. Lors de la récolte, des petites coupes de régénération sont réalisées dans les bouquets les plus âgés et des éclaircies dans les bouquets plus jeunes. Des essences diverses peuvent être mélangées, par bouquets, ou au sein du même bouquet.

1.2.1.5 La Futaie irrégulière par pied d'arbre

Ce système est relativement limité en ambitions et économe en moyens (Dubourdieu, 1997). Il ne cherche pas à influer la composition ou la structure des peuplements. Les coupes favorisent la récolte des plus beaux arbres avant leur sénescence et elles peuvent également avoir pour but d'accroître la vigueur du peuplement par l'éclaircie ainsi que de stimuler la régénération par la mise en lumière.

1.2.2. Systèmes sylvicoles produisant des taillis

1.2.2.1 Le taillis

Ces forêts sont d'origine végétatives et proviennent soit de rejets de souches soit de drageons. L'utilisation du taillis est limitée à l'aménagement des forêts de feuillus. La

révolution dans ce système sylvicole est relativement courte et généralement inférieure à 30 ans et a essentiellement pour but la production de bois de chauffage et de piquets.

1.2.2.2 Le taillis sous futaie

Ce système est un mélange de taillis et de futaie. La strate dominante est formée d'arbres issus de graines, et le sous étages par les rejets de souches issus de multiplication végétative. Le taillis est récolté régulièrement, alors que les arbres de l'étage dominant sont conservés pour produire des tiges de forte dimension destinées à la construction.

2. Différents types de structures irrégulières

Selon la définition de Helms (1998) : « un système de sélection inéquien régénère et maintien un structure pluri-âges en récoltant des arbres dans toutes les classes de diamètres, que ce soit par arbre seul, par groupes d'arbres ou en bande ». De plus, dans un système sylvicole inéquien ont retrouve un minimum de trois classes d'âge (Baker *et al.*, 1996 ; Nyland 1996). Il faut cependant faire une distinction entre le terme équien et le terme irrégulier dans la mesure ou l'un (équien) se réfère à l'âge du peuplement alors que l'autre (irrégulier) fait référence à la structure du peuplement. La structure d'un peuplement est définie par l'âge ou le diamètre et la hauteur des

arbres qui le composent (Baker *et al.*, 1996 ; Anonyme, 2003). Celle-ci permet de connaître l'origine du peuplement et révèle également la forme de la canopée. Il existe un très grand nombre de structures que l'on peut qualifier d'irrégulières (Figure 3). Avec certaines essences la mise en place d'une de peuplement irrégulier dont la distribution des diamètres est basée sur la courbe en J, peut être très difficile à obtenir. Des peuplements avec deux, trois ou quatre classes d'âge peuvent offrir des bénéfices comparables à ceux des peuplements irréguliers de structures plus complexes (O'Hara, 2001 ; Kenk et Guehne, 2001 ; Nyland 2003). Ils sont également plus simples et plus économiques à mettre en place (O'Hara, 2001). La structure en J inversé (Figure 2), que l'on retrouve dans de nombreux peuplements naturels, est souvent considérée comme étant une distribution idéale des diamètres dans les peuplements irréguliers (Baker *et al.*, 1996 ; Guldin et Baker, 1998 ; Kerr, 1999 ; Nyland, 2003).Cette courbe correspond à la distribution des classes de diamètres après la récolte. Pour obtenir cette distribution, il est nécessaire de déterminer et connaître différents paramètres :

-Détermination du facteur q (le facteur q correspond au coefficient de passage du nombre de tiges d'une classe de diamètre à la classe de diamètre supérieur).

-Détermination de la surface terrière.

-Accroissement annuel en volume du peuplement

-Choix du diamètre maximum d'exploitabilité.

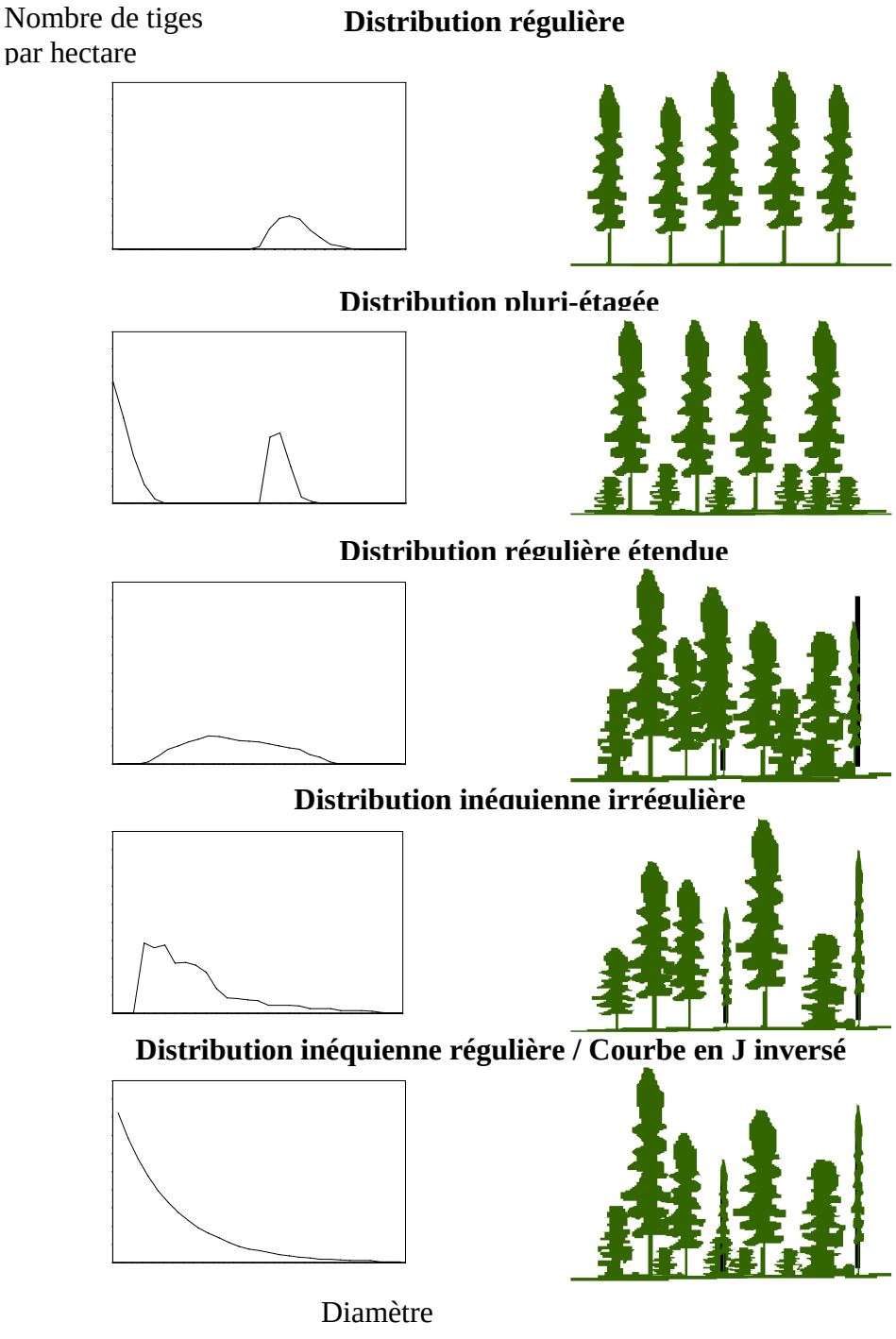


Figure 3 : Distribution diamétrale et profil schématique de différents peuplements d'après Lähde *et al.* (1999) et Baker *et al.* (1996).

3. La conversion des peuplements réguliers en peuplements irréguliers

Il est possible d'augmenter la variabilité des peuplements réguliers sans pour autant avoir une transformation majeure de la structure d'âge (O'Hara, 2001). Ce type de transformation implique un processus par lequel un peuplement régulier est changé en un peuplement de structure irrégulière, structure caractérisée par une diversité de tailles d'arbres et la mise en place d'un couvert permanent (Malcolm *et al.*, 2001). Il va donc y avoir passage d'une structure très simple, homogène et relativement bien comprise vers une structure qui est hautement variable et qui comporte beaucoup d'interactions complexes (O'Hara, 2001). Pour créer et maintenir ce type de structure il est nécessaire de réaliser des interventions fréquentes (Grassi *et al.*, 2003). Il existe des exemples très anciens de transformation des peuplements réguliers en peuplements irréguliers, certains de ceux-ci remontant, en Suisse et en Allemagne, à plus de cent ans (Schütz, 1990 ; Kenk et Guehne, 2001 ; Guldin et Farrar, 2002). La transformation des peuplements réguliers en peuplements irréguliers est une tâche très longue et très difficile (Schütz, 2001 ; Krüger- Jacobsen, 2001 ; Guldin et Farrar, 2002) et elle n'aurait pas d'impact négatif sur l'accroissement. Selon Sterba et Zingg (2001). La conversion n'entraîne pas de diminution de l'accroissement annuel et dans certains cas, des augmentations de l'accroissement annuel ont été reportées (Kenk et Guehne, 2001).

Il y existe plusieurs règles à respecter pour réussir avec succès la conversion des peuplements (Mason et Kerr, 2001 ; Schütz, 2001 ; Nyland, 2003) :

-Récolter les arbres matures sur une longue période de temps

-Établir une régénération quasi-continue

-Maintenir la diversité des espèces

-Obtenir une grande production de graines

-Protéger les arbres durant l'exploitation

-Réguler le nombre de tiges dans chaque classe de diamètre

Il faut également respecter différentes étapes pour réussir la transformation des peuplements (Schütz, 2001) :

1) Différenciation. Étape dans laquelle le but principal est de promouvoir chaque élément de valeur qui assure le développement de la structure.

2) Promotion de la régénération. À cette étape, l'attention principale est de favoriser la mise en place de nouveau groupe de régénération.

3) Développement structural. Pour cette étape, l'attention est portée sur le développement d'une bonne distribution des éléments structuraux qu'ils soient horizontaux ou verticaux.

4) Réussite de la structure. À cette dernière étape, le focus est mis sur l'atteinte de l'individualisation des groupes restants.

Il est nécessaire de porter une attention particulière au moment de la transition entre l'exclusion des tiges et la ré initiation de la régénération. En effet, le stade précédent est caractérisé par un peuplement régulier occupant l'ensemble de l'espace de croissance disponible alors que le nouveau stade est caractérisé par la régénération de nouvelles cohortes et le développement d'une nouvelle variabilité structurelle (Schütz, 2002). Il est souvent très difficile de créer des trouées dans des peuplements réguliers qui vont permettre d'obtenir une régénération suffisante et ensuite que ces trouée soient suffisamment grandes pour que celles-ci puissent croître et ainsi assurer un recrutement (Schütz, 2001 ; Malcolm *et al.*, 2001 ; Nyland, 2003). Il est également très important d'assurer l'établissement et le développement des espèces désirées, car il s'agit du facteur crucial pour la réussite de la conversion (Guldin et Farrar, 2002 ; Hasenauer et Kindermann, 2002). Les sylviculteurs qui mettent en place des traitements pour encourager de nouvelles classes d'âge d'arbres doivent être conscients de la nécessité de fournir une place suffisante à la croissance de la régénération et des gaules (O'Hara, 2001 ; Mason et Kerr, 2001). Il est également nécessaire de porter une attention particulière au moment ou l'on souhaite débuter la conversion (Figure 4) (Schütz, 1997 ; O'Hara, 2001 ; Mason et Kerr, 2001). En effet, l'âge du peuplement va influencer le choix de la méthode à utiliser. Si le peuplement n'a jamais subit d'éclaircie, il faut établir s'il reste suffisamment d'arbres capables de supporter la transformation sur une longue période dans le peuplement. En général, l'objectif des sylviculteurs qui réalisent une conversion est de créer des peuplements

dont la structure suit la distribution de la courbe en J inversé. Cette distribution sera cependant plus difficile à obtenir de peuplements réguliers que de peuplements pluri-étagés (O'Hara, 2001). Dans le premier cas, il faudra de nombreuses interventions sylvicoles, alors que dans le second cas, des éclaircies jardinatoires pourront être suffisantes.

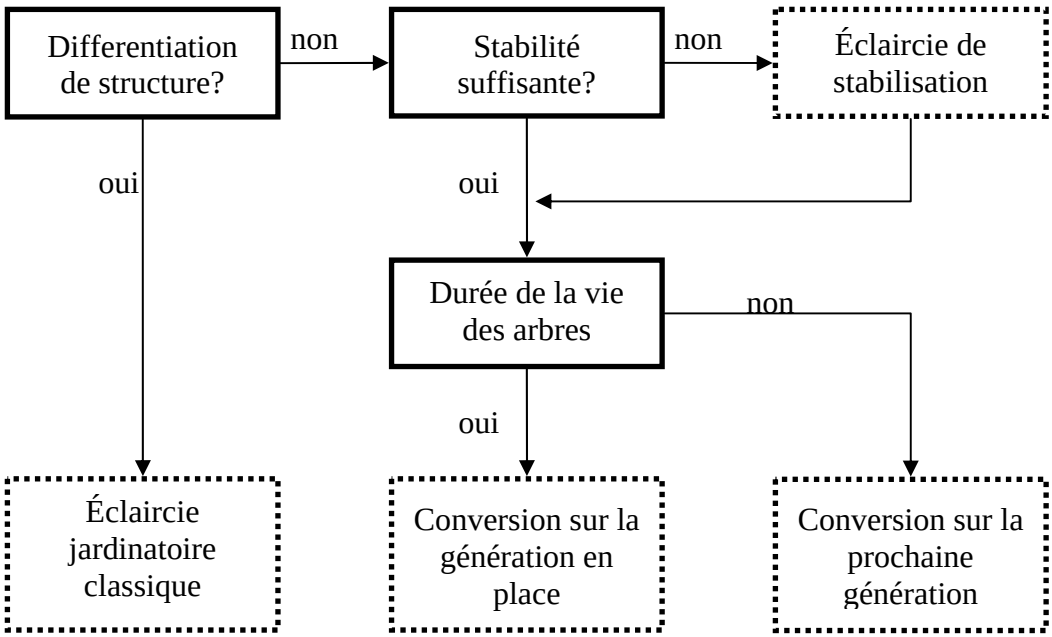


Figure 4 : Représentation schématique des décisions sylvicoles en phase de conversion conduisant à différents modes de conversion issue de Schütz (1997).

Des variations des systèmes utilisés pour maintenir les peuplements irréguliers peuvent être appropriées pour transformer des peuplements réguliers en peuplements irréguliers et maintenir ces structures à travers le temps (O'Hara *et al.*, 2001). Les coupes d'ensemencement et les coupes avec réserve de semencier peuvent permettre d'atteindre cet objectif, de même qu'un système basé sur un mélange de coupes

d'ensemencement et de trouées, pourrait également s'avérer être un très bon compromis (O'Hara, 2001 ; Mason 2001 ; Schütz, 2002 ; Nyland, 2003).

Les modèles de succession naturelle peuvent être de très bons indicateurs pour les différents stades par lesquels le peuplement doit évoluer lors de sa conversion. La transformation peut être vue comme une accélération du développement naturel pour atteindre le degré désiré d'irrégularité (Mason *et al.*, 2001). La succession forestière décrite par Bergeron *et al.* (1999, 2002) pourrait par conséquent être un excellent modèle de conversion des peuplements réguliers naturels en peuplements irréguliers de structure complexe pour l'ouest du Québec.

4. Influence sur la régénération

La structure du peuplement va avoir une influence prédominante sur la distribution et la croissance de la régénération (Grassi *et al.*, 2004). De plus, le dosage de la lumière va jouer un rôle très important dans l'installation et la croissance de la régénération (Schütz, 1990 ; Schütz, 1997). L'occurrence des années semencières et de la germination va avoir une influence déterminante pour maintenir la productivité dans le long terme (Øyen et Nilsen, 2002). Les dommages à la régénération causés lors de l'exploitation pourraient être élevés dans un peuplement irrégulier. Le jardinage par groupe semble être une solution pour limiter les dommages à la régénération en raison de la différenciation des classes d'âge (Shelton et Murphy, 1999).

L'aménagement inéquien favorise l'obtention d'une régénération naturelle, ce qui n'est pas toujours le cas dans le cas d'un aménagement normal (équien).

Une étude réalisée en Alaska pour comparer la coupe totale et la coupe progressive sur une période de 27 ans n'a pas permis de mettre en évidence une différence dans la régénération des peuplements. Par contre, le fait de laisser un certain nombre de tiges sur pied a permis de créer une diversité structurale et une source potentielle de débris ligneux (Wurtz et Zasada, 2001).

5. Influence sur la croissance

Il existe une différence importante dans l'accroissement radial des tiges d'une futaie jardinée et d'un peuplement régulier (Schütz, 1997). Dans le cas des futaies jardinées, l'accroissement est très lent pendant la jeunesse, puis augmente progressivement pour rester par la suite soutenu et régulier, alors que dans le cas des futaies régulières l'accroissement augmente très vite pour atteindre son maximum et ensuite ralentir. De plus pour maintenir l'accroissement du peuplement il est important de ne pas récolter une proportion trop importante du volume sur pied car cela pourrait entraîner une diminution de l'accroissement annuel (Øyen et Nilsen, 2002).

La qualité des tiges résiduelles va être très importante. En effet, si des tiges vigoureuses sont préservées, la croissance des arbres et du peuplement peu

augmenter. Ces résultats ont été obtenus dans des peuplements mixtes d'épinettes de Sitka (*Picea Sitkensis* (Bong.) Carr.) et de Tsugas de l'Ouest (*Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg.) en Alaska (Deal et Tappeiner, 2002). Des résultats similaires ont également été obtenus en Finlande. En effet, une étude qui comparait l'éclaircie par le bas et le jardinage dans des peuplements d'épinettes de Norvège (*Picea abies* (L.) Karst.) a mis en évidence une accroissement moyen supérieur dans les peuplements traités par le jardinage après un suivis de 11 ans (Lähde *et al.*, 2002).

En Norvège la réalisation sur plus de 25 ans de récolte variant entre le jardinage par pied d'arbre et le jardinage par bouquet dans des peuplements d'épinettes de Norvège a permis de mettre en évidence que l'accroissement le plus faible était obtenu dans les peuplements les plus denses (Øyen et Nilsen, 2002). Dans cette même étude, le plus fort accroissement en diamètre, suite à la récolte, fut obtenu pour les tiges des petites et moyennes classes de diamètre.

6. Débris ligneux et arbres morts

Les systèmes sylvicoles développés pour la gestion des peuplements inéquiens sont des systèmes visant la production de matière ligneuse et n'intègrent pas la création de chicots ou de débris ligneux de taille importante, les arbres étant prélevés avant d'atteindre un stade de sénescence. Pourtant, les chicots et les débris ligneux sont une

composante importante de la diversité des peuplements inéquiens (Harper *et al.*, 2003).

L'utilisation du brûlage dans les peuplements pourrait permettre d'y augmenter la présence de bois mort (Kuuluvainen *et al.*, 2002). Cependant, ce type de pratiques peut avoir un effet négatif sur la régénération et les gaules en entraînant une forte mortalité de celles-ci (Linder *et al.*, 1998). Par contre pour les classes de diamètre les plus importantes, la mortalité diminue avec l'augmentation en taille. Linder *et al.*, (1998) suggèrent de réaliser l'annélation ou l'abattage de certains des plus gros arbres de façon à créer de grands arbres morts sur pieds ou au sol.

7. Utilisation de modèles

Le développement des modèles pourrait être un outil très utile pour déterminer les meilleures stratégies dans le cas de la conversion des peuplements, mais également pour déterminer le cycle de coupe et les objectifs de récolte. Plusieurs de ces modèles ont été utilisés pour déterminer les meilleures stratégies d'intervention (fréquence, taux de prélèvement) dans les peuplements. Le modèle ZELIG.PNW (3.0) gap model a notamment été utilisé pour simuler des conversions. Des simulations réalisées à partir du modèle ZELIG.PNW (3.0) gap model indiquent que pour le Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) de la côte ouest des Etats-Unis, il est nécessaire d'intervenir dans des peuplements où les arbres sont relativement jeunes

pour accélérer le développement de peuplements possédant les attributs de peuplements de fin de succession (Garman *et al.*, 2003). Le temps nécessaire à l'obtention de ces peuplements varie avec la densité du couvert maintenue à la fin de la première intervention. Une stratégie basée sur de multiples éclaircies peut permettre un développement rapide des peuplements possédant les attributs de stade de fin de succession (Garman *et al.*, 2003). Ce modèle indique que différentes stratégies d'aménagement sont envisageables pour arriver à un même résultat. Cependant, le temps nécessaire pour atteindre les objectifs de structures et de compositions varie de façon importante. Le volume total récolté pour une même période de temps est également très variable selon la stratégie choisie. D'autres modèles, tel que le modèle Masam (O'Hara et Valappil, 1999), peuvent également être utilisés pour gérer la densité d'un peuplement inéquien et déterminer la périodicité des interventions. Le modèle CAPSIS a été utilisé pour simuler des éclaircies et convertir des peuplements d'épinettes de Norvège réguliers en peuplements irréguliers (Courbaud *et al.*, 2001). La simulation a mis en évidence la difficulté de gérer le rapport entre le volume sur pied et la régénération. Ce modèle a également mis en évidence qu'un jardinage par pied d'arbre homogénéise la répartition spatiale des tiges et favorise la croissance des plus grosses tiges et la stagnation des plus petites alors que le jardinage par groupe crée des conditions hétérogènes et fournit plus d'opportunités de croissance aux petites tiges et à la régénération.

8. Impacts économiques

Lors de l'examen de l'impact économique de la conversion de peuplements réguliers en peuplements irréguliers il faut distinguer les coûts liés à la conversion et ceux qui se produisent à long terme (Hanewinkel, 2001). Le coût de la transformation est généralement calculé par la différence nette de la valeur présente entre la conversion et un régime de classe d'âge équien qui peut être élevé (Hanewikel, 2001 ; Knoke et Plusczyk, 2001). Les taux d'actualisation utilisés dans les calculs vont avoir une grande importance dans la différence qui peut exister entre la conversion et le maintien de systèmes sylvicoles produisant des peuplements réguliers. Une fois la conversion terminée, les revenus générés dans les peuplements irréguliers vont être supérieurs à ceux générés dans des peuplements équiens (Hanewikel, 2001).

Dans les peuplements irréguliers, les revenus vont être fréquents, contrairement à ceux obtenus dans des peuplements réguliers (Baker *et al.*, 1996), la longueur des cycles ayant une importance économique non négligeable (Øyen et Nilsen, 2002). Une étude réalisée en Norvège sur différents types de sylviculture de peuplements irréguliers d'épinettes de Norvège montre que les coûts de récolte liés au jardinage sont d'environ 10% supérieurs à ceux liés à la coupe totale (Andresassen et Øyen, 2002). Ces coûts supplémentaires sont liés aux plus grandes distances de débardages et à l'espace limité entre les arbres pour réaliser l'abattage.

Les études économiques réalisées sur la transformation des peuplements ou la sylviculture de peuplements irréguliers, ne considèrent que la valeur marchande des arbres et n'intègrent pas la valeur que pourrait avoir un peuplement irrégulier au niveau biologique. Il pourrait pourtant être intéressant de comptabiliser cette valeur dans les calculs économiques (Buongiorno, 2001). De plus, le choix du stade final de développement peut également influencer le résultat des coûts liés à la conversion (Buongiorno, 2001).

Toutes ces études ont cependant été réalisées dans des pays où la production de bois est orientée sur la qualité des produits et non pas sur la quantité comme c'est le cas au Québec. Les résultats pourraient donc être très différents des résultats obtenus dans ces pays. Les coûts lié à un aménagement inéquien de la forêt boréale québécoise pourraient donc être relativement plus élevé que ceux lié à un aménagement équien en nécessitant entre autre un réseau de chemin permanent, et un effort de planification accru.

Conclusion

Il existe de nombreux exemples de la réussite d'aménagements inéquiens des peuplements de conifères à travers le monde, certains systèmes sylvicoles tels que le jardinage ayant démontré depuis longtemps leur faisabilité. Cependant, il est important de ne pas appliquer un système en se basant sur des normes établies pour d'autres essences, dans d'autres conditions climatiques et pour des stations différentes.

Ces systèmes sont développés pour la production de bois et la maximisation de la récolte. La conservation d'arbres morts sur pied et la création de débris ligneux ne sont que très rarement abordées. Pourtant, ceux-ci sont une composante importante des peuplements naturels dont on veut recréer au Québec les principales composantes de structure et de composition. Un effort important devra donc être fourni pour intégrer ces composantes dans l'aménagement inéquien qui sera développé.

Un aménagement inéquien requiert un effort de planification, de suivi des peuplements et d'interventions sylvicoles supérieur à ce qui est actuellement le cas pour les peuplements de la pessière à mousse ou de la sapinière à bouleaux blancs. Ce type d'aménagement requiert de plus un réseau routier permanent. Ces différents facteurs impliquent des coûts supplémentaires. L'utilisation de modèles pourra permettre d'optimiser le type de récolte ainsi que leur planification mais également

lors de la conception des structures permanentes. La mise en place de ce type d'aménagement devra en plus être modulable pour qu.il puisse être réalisé avec succès et non pas soumis à des normes strictes.

Lors de la transformation de peuplements réguliers en peuplements irréguliers, il est important de commencer les interventions dans des peuplements relativement jeunes, où les arbres peuvent facilement réagir à l'intervention. De plus, le fait de commencer les interventions dans ce type de peuplement pourra peut être limiter le phénomène de paludification mis en évidence dans les peuplements d'épinettes noires (*Picea mariana* Mill.) de la ceinture d'argile du Nord du Québec et de l'Ontario.

Les futaies jardinées sont des structures artificielles crée par l'Homme, qui seront perdues rapidement si l'aménagement continu est arrêté (Zingg *et al.*, 1997 ; Schütz, 2001 ; Schütz, 2002). Il est de plus très important d'assurer une régénération continue dans ces peuplements (Hasenauer et Kindermann, 2002) de même que pour la plupart des systèmes sylvicoles inéquiens. Ceux-ci requièrent également une intention particulière portée au développement de la régénération, mais également aux arbres laissés sur pieds lors de la récolte.

Il faudra également mettre un effort sur la formation des travailleurs forestiers. En effet, l'expérience montre que les travailleurs forestiers possédant une bonne formation et une bonne compréhension des interrelations existant dans l'écosystème

forestier sont capables d'appliquer le système de la futaie jardinée (Zingg *et al.*, 1997).

Tableau 1 : Synthèse des arguments pour le passage à l'aménagement inéquien de la pessière noire à mousse et de la sapinière à bouleau blanc

Pour	**Contre**
-Très bonne connaissance de la dynamique naturelle des peuplements	-Effort de planifications accru
-Maintien de mosaïques forestières comportant des peuplements irréguliers	-Le nombre d'espèces et leur mélange dans la sapinière complique la gestion
-La dynamique naturelle tend à créer des peuplements irréguliers	-Risque de perte de productivité lié à l'entourbement dans la pessière
-Aménagement actuel non adapté au maintien de la biodiversité et des fonctions des écosystèmes	-Risque de chablis accru si réalisé dans des peuplements non-éduqués
-La composition des peuplements de la pessière facilite l'aménagement inéquien	-Formation plus importante des opérateurs et contremaître
-Protection des sols	-Équipement actuel non-adapté
-Favorise la qualité de la production plutôt que la quantité	-Coûts plus élevés
	-Risque de maladies plus élevées
	-Une grande partie de l'équipement actuel n'est pas adapté
	-Territoire plus ouvert en raison de la présence d'un réseau de chemin permanent

Bibliographie

ATTIWILL P.M. 1994. The disturbance of forest ecosystems : the ecological basis for conservation management. For. Ecol. Manag. **63** : 247-300.

ANDREASSEN K. et B.-H. ØYEN. 2002. Economic consequences of three silvicultural methods in uneven-aged mature coastal spruce forests of central Norway. Forestry. **75** (4) : 483-488.

ANONYME. 1995. Silvicultural systems guidebook. B.C. Forest Practices Code Guidebook. B.C. Ministry of Forests and BC Environment. Victoria, Colombie Britannique.

ANONYME. 2002. Managing you woodland : a non-forester's guide to smallscale forestry in British Columbia. Small Woodlands Program of BC and Canadian Forest Service. Victoria, Colombie Britannique.

ANONYME. 2003. Dictionnaire de la foresterie. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Québec.

BAKER J.B., M.D. CAIN, J.M. GULDIN, P.A MURPHY et M.G. SHELTON. 1996. Uneven-Aged Silviculture for the Lobolly and Shortleaf Pine Forest Cover Types. USDA Forest Service. Gen. Tech. Rep. SO-1= 18.

BERGERON Y., A. LEDUC, B. HARVEY et S. GAUTHIER. 2002. Natural Fire Regime : A Guide for Sustainable Management of the Canadian Boreal Forest. Silva Fennica. **36** (1) : 81-95.

BERGERON Y. et B. HARVEY. 1997. Basing silviculture on natural ecosystem dynamics : an approach applied to the southern boreal mixedwoods of Quebec. For. Ecol. Manag. **92** : 235-242.

BERGERON Y., B. HARVEY, A. LEDUC et S. GAUTHIER. 1999. Stratégies d'aménagement forestier qui s'inspirent de la dynamique des perturbations naturelles : considérations à l'échelle du peuplement et de la forêt. For. Chron. **75** (1) : 55-61.

BERGERON Y., S. GAUTHIER, V. KAFKA, P. LEFORT et D. LESSIEUR. 2001. Natural fire frequency for eastern Canadian boreal forest : consequences for sustainable forestry. Can. J. For. Res. **31** : 384-391.

BESCOND H. 2002. Reconstitution de l'historique de l'exploitation forestière sur le territoire de la forêt d'enseignement et de recherche du lac Duparquet au cours du 20ème siècle et influence sur l'évolution des peuplements forestiers**.** Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en biologie. Université du Québec à Montréal.

BUNONGIORNO J. 2001. Quantifying the implications of transformation from even to uneven-aged forest stands. For. Ecol. Manag. **151** : 121-132.

BURNS R.M. 1983. Silvicultural Systems for the Major Forest Types of the United States. USDA Forest Service. Agricultural Handbook No 445.

BURTON P.J., C. MESSIER, G.F. WEETMAN, E.E. PREPAS, W.L. ADAMOWICZ et R. TITTLER. 2003. The current state of boreal forestry and the drive for change. Chapitre 1. *Dans* Towards Sustainable Management of the Boreal Forest. Éditeurs : P.J. Burton, C. Messier, D.W. Smith et W.L. Adamowicz. NRC Research Press, Ottawa, Ontario. Pp. 307-368.

COURBAUD B., F. GOREAUD, P. DREYFUS et F.R. BONNET. Evaluating thinning strategies using a tree distance dependent growth model : some examples based on the CAPSIS software « uneven-aged spruce forests » module. For. Ecol. Manag. **145** : 15-28.

DEAL R. et J.C. TAPPEINER. 2002. The effects of partial cutting on stand structure and growth of western hemlock-Sitka spruce stands in southeast Alaska. For. Ecol. Manag. **159** : 173-186.

DEAL R., J.C. TAPPEINER et P.E. HENNON. 2002. Developing silvicultural systems based on partial cutting in western hemlock-Sitka spruce stands of southeast Alaska. Forestry. **75** (4) : 425-431.

De LIOCOURT F. 1898. De l'aménagement des sapinières. Bulletin trimestriel, Société forestière de Franche-Comté et Belfort, juillet 1898. 396-409.

DUBOURDIEU J. 1997. Dossier Sylviculture. Office National des Forêts. Arborescences n°68.

GAMBORG C. et J.B. LARSEN. 2003. Back to nature - a sustainable future for forestry? For. Ecol. Manag. **179** : 559-571.

GARMAN S.L., J.H. CISSEL et J.H. MAYO. 2003. Accelerating Development of Late-Successional Conditions in Young Managed Douglas-Fir Stands : A Simulation Study. USDA Forest Service. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-557.

GAUTHIER S., A. LEDUC et Y. BERGERON. 1996. Forest dynamics modelling under a natural fire cycle : A tool to define natural mosaic diversity in forest management. Environnemental Monitoring and Assessment. **39** : 417-434.

GRAHAM R.T. et T.B. JAIN. Silviculture's role in managing boreal forests. Conservation Ecology. **2** (2) : 8-17

GRASSI G., G. MINOTTA, G. TONON et U. BAGNARESI. 2004. Dynamics of Norway spruce and silver fir natural regeneration in a mixed stand under uneven-aged management. Can. J. For. **34** : 141-149.

GRASSI G., G. MINOTTA, R. GIANNINI et U. BAGNARESI. 2003. The structural dynamics of managed uneven-aged conifer stands in the Italian eastern Alps. For. Ecol. Manag. **185** : 225-237.

GULDIN J.M. et J.B. BAKER. 1998 Uneven-Aged Silviculture : Southern Style. Forestry. **96** (7) : 22-26.

GULDIN J.M. et R.M. FARRAR. 2002. The plantation conversion demonstration at the crossett experimental forest - Implication for converting stand from even-aged tu uneven-aged structure. Dans : Proceedings of the eleventh biennal southern silvicultural research conference. Éditeurs : K.W. Outcalt. Gen. Tech. Rep. SRS-48. Asheville, NC :USDA Forest Service.

HAEUSSLER S. et D. KNEESHAW. 2003. Comparing forest management ton natural processes. Chapitre 9. *Dans* Towards Sustainable Management of the Boreal Forest. Éditeurs : P.J. Burton, C. Messier, D.W. Smith et W.L. Adamowicz. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada. Pp. 307-368.

HANEWINKEL M. 2001. Economic aspects of the transformation from even-aged pure stands of Norway spruce to uneven-aged mixed stands of Norway spruce and beech. For. Ecol. Manag. **151** : 181-193.

HARE F.K. et J.C. RITCHIE. 1972. The boreal bioclimates. Geogr. Rev. **62** : 334-365.

HARPER K., C. BOUDREAULT, L. DEGRANDPRÉ, P. DRAPEAU, S. GAUTHIER et Y. BERGERON. 2003. Structure, composition, and diversity of old-growth black spruce boreal forest of the Clay Belt region in Quebec and Ontario. Environ. Rev. **11**: S79-S98.

HARVEY B.D., T. NGUYEN-XUAN, Y. BERGERON, S. GAUTHIER et A. LEDUC. 2003. Forest management planning based on natural disturbance and forest dynamics. Chapitre 11. *Dans* Towards Sustainable Management of the Boreal Forest. Éditeurs : P.J. Burton, C. Messier, D.W. Smith et W.L. Adamowicz. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada. Pp. 395-432.

HASENAUER H. et G. KINDERMANN. 2002. Methods for assessing regeneration establishment and height growth in uneven-aged mixed species stands. Forestry. **75** : 385-394.

HELLIWELL D.R. 1997. Dauerwald. Forestry. **70** (4) : 375-379.

HELMS J.A. 1998. The Dictionary of Forestry. Society of American Foresters, Bethesda (Etats-Unis).

JACOBSEN M. 2001. Histoire et principes de la sylviculture écologique dans une perspective centre-européenne. *Dans* Outils pour la préservation de la biodiversité forestière. Naconex, Töreboda (Suède).

KENK G. et S. GUEHNE. 2001. Management of transformation in central Europe. For. Ecol. Manag. **151** : 107-119.

KERR G. 1999. The use of silvicultural systems to enhance the biological diversity of plantation forests in Britain. Forestry. **72** (3) : 191-205.

KIMMINS J.P. et W. WEIN. 1986. Introduction. *Dans* Forest Ecosystems in the Alaskan Taïga. Éditeurs : K. Van Cleve, F.S. Chapin III, P.W. Flanagan, L.A. Viereck et C.T. Dyrness. Springer-Verlag, New York.

KNOKE T. et N. PLUSCZYK. 2001. On economic consequences of transformation of a spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) dominated stand from regular into irregular age structure. For. Ecol. Manag. **151** : 163-179.

KUULUVAINEN, T. 2002. Disturbance dynamics in boreal forests : Defining the ecological basis of restoration and management of biodiversity. Silva Fennica. **36** (1) : 5-12.

KUULUVAINEN T, K. AAPALA, P. AHLROTH, M. KUUSINEN, T. SALLANTAUS, J. SIITONEN et H. TUKIA. 2002. Principles of Ecological Restoration of Boreal Forested Ecosystems : Finland as an Example. Silva Fennica. **36** (1) : 409-422.

LÄHDE E, O. LAIHO et Y. NOROKORPI. 1999. Diversity-oriented silviculture in the Boreal Zone of Europe. For. Ecol. Manag. **118** : 223-243.

LÄHDE E, O. LAIHO, Y. NOROKORPI et T. SAKSA. 2002. Development of Norway spruce dominated stands after single-tree selection and low thinning. Can. J. For. Res. **32** : 1577-1584.

LARSEN J.A. 1980. The Boreal Ecosystem. Academic Press. New York.

LIEFFERS V.J., C. MESSIER, P.J. BURTON, J.-C. RUEL et B.E. GROVER. 2003. Nature-based silviculture for sustaining a variety of boreal forest values. Chapitre 13. *Dans* Towards Sustainable Management of the Boreal Forest. Éditeurs : P.J. Burton, C. Messier, D.W. Smith et W.L. Adamowicz. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada. Pp. 481-530.

LINDER P., P. JONSSON et M. NIKLASSON. 1998. Tree mortality after prescribe burning in an old-growth Scots pine forest in northern Sweden. Silva Fennica. **32** (4) : 339-349.

MALCOLM D.C., W.L. MASON et G.C. CLARKE. 2001. The transformation of conifer forests in Britain-regeneration, gap size and silvicultural systems. For. Ecol. Manag. **151** : 7-23.

MASON B. et G. KERR. 2001. Transforming Even-aged Conifer Stand to Continous Cover Management. Forestry Commission, Edinburgh. FCIN 40.

MASON B., G. KERR et J. SIMPSON. 1999. What is Continous Cover Forestry? Forestry Commission, Edinburgh. FCIN 29.

MATTHEWS D. 1989. Silvicultural Systems. Clarenton Press, Oxford.

McCLELLAN H., D.N. SWANSTON, P.E. HENNON, R.L. DEAL, T.L De SANTO et M.S. WIPFLI. 2000. Alternatives to Clearcutting in the Old Growth Forest of Southeast Alaska : Study Plan and Establishment Report. USDA Forest Service. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-494. Portland, Oregon

MITCHELL S.J. et W.J. BEESE. 2002. The retention system : reconciling variable retention with the principles of silvicultural systems. For. Chron. **78** (3) : 397-403.

MRNPF. 2003. Manuel d'aménagement forestier. 4ème édition. Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Québec.

NYLAND R.D. 1996. Silviculture : concepts and applications. McGraw-Hill, New-York.

NYLAND R.D. 2003. Even- to uneven-aged : the challenges of conversion. For. Ecol. Manag. **172** : 291-300.

O'HARA K. 2001. The silviculture of transformation - a commentary. For. Ecol. Manag. **151** : 81-86.

O'HARA K. 2002. The historical development of uneven-aged silviculture in North America. Forestry. **75** (4) : 339-346.

O'HARA K., E. LÄHDE, O. LAIHO, Y. NOROKORPI et T. SASKA. 2001. Leaf area allocation as a guide to stocking control in multi-aged, mixed-conifer forests in southern Finland. Forestry. **74** (2) : 171-185.

O'HARA K. et N.I. VALAPPIL. 1999. Masam-a flexible stand density management model for meeting diverse structural objectives in multiaged stands. For. Ecol. Manag. **118** : 57-71.

ØYEN B.H. et P. NILSEN. 2002. Growth effects after mountain selective cutting in southeast Norway. Forestry. **75** (4) : 401-410.

RYAN K.C. 2002. Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems. Silva Fennica. **36** (1) : 13-39.

SCHULTE B.J. et J. BUONGIORNO. 1998. Effects of uneven-aged silviculture on the stand structure, species composition, and economic return of lobolly pine stands. For. Ecol. Manag. **111** : 83-101.

SCHÜTZ J.-P. 1990. Sylviculture 1 : Principes d'éducation des forêts. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne (Suisse).

SCHÜTZ J.-P. 1997. Sylviculture 2 : La gestion des forêts irrégulières et mélangées. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne (Suisse).

SCHÜTZ J.-P. 2001. Opportunities and strategies of transforming regular forests to irregular forests. For. Ecol. Manag. **151** : 87-94.

SCHÜTZ J.-P. 2002. Silvicultural tools to develop irregular and diverse forest structures. Forestry **75** (4) : 329-337.

SEYMOUR R.S. et M.L. HUNTER. 1999. Principles of ecological forestry. *Dans* Maintaining biodiversity in forest ecosystem. Éditeur : M.L. Hunter. Cambridge University Press, Cambridge.

SHELTON M.G. et P.A. MURPHY. 1999. Disturbance from the initial harvest implementing uneven-aged silviculture in a pine-hardwood stand in southwestern Mississippi. Thenth Biennial Silvicultural Research Conference, Shreveport, Los Angeles, 14 au 18 Février 1999.

SIROIS L. 1992. The transition between boreal forest and tundra. *Dans* A Systems Analysis of the Global Boreal Forest. Éditeurs : H.H. Shugart, R. Leemans et G.B. Bonan. Cambridge University Press, Cambridge.

SMITH D.M., B.C. LARSON, M.J. KELTY et P.M.S. ASHTON. 1997. The pratice of silviculture : Applied Forest Ecology. 9ème édition. John Wiley & Sons, New York.

STERBA H. et A. ZINGG. 2001. Taget diameter harvesting-a strategy to convert even-aged forests. For. Ecol. Manag. **151** : 95-105.

TIMONEY K. 1998. Clearcut logging, plantation forestry, resistance to change and the future of old-growth forests. Ecoforestry. **13** (2) :14-23.

WEETMAN G.F. 1996. Are European Silvicultural Systems and Precedents Useful for British Columbia Silviculture Prescriptions? FRDA Report 239.

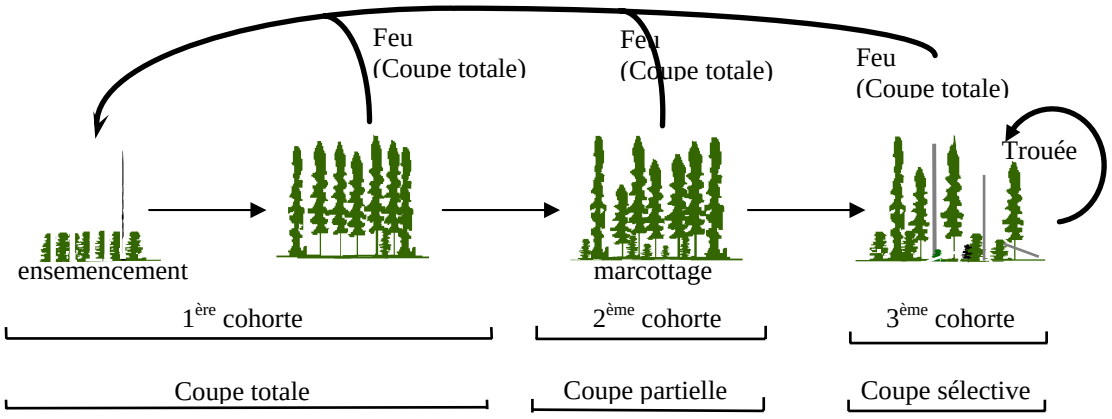
WURTZ T.L. et J.C. ZASADA. 2001. An alternative to clear-cutting in the boreal forest of Alaska : a 27-year study of regeneration after shelterwood harvesting. Can. J. For. Res. **31** : 999-1011.

ZINGG A., V. ERNI et C. MOHR. 1997. Selection Forests-A Concept for Sustainable Use. 90 Years of Experience of Growth and Yield Research in Selection Forestry in Switzerland. *Dans* Emmingham, W.H. Procceedings of the IUFRO Interdisciplinary Uneven-aged Management Symposium, September 1997. Corvalis, Forest Research Laboratory, Oregon State University. 415-434.

Annexe 1

Annexe 1 : Dynamique naturelle des peuplements forestiers et sylviculture proposée pour la Pessière noire à mousse et la Sapinière à bouleau blanc de l'Ouest du Québec.

Pessière noire à mousses



Sapinières à bouleau blanc

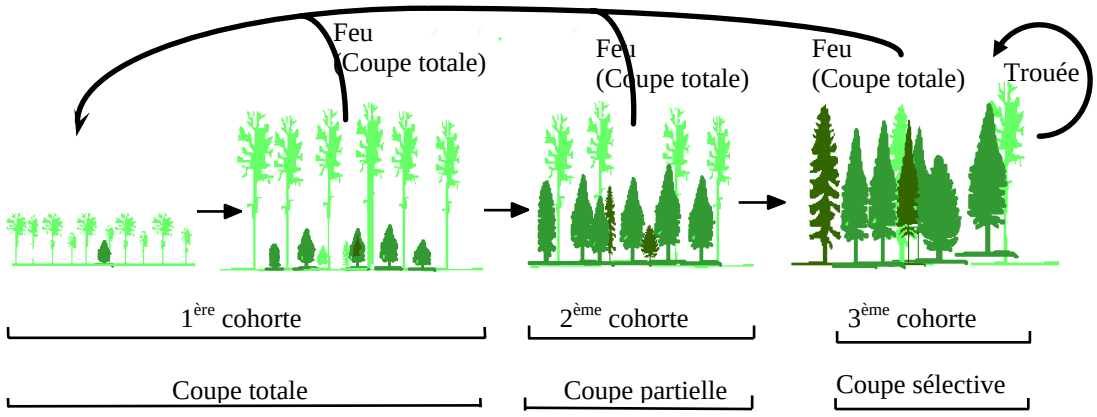


Figure 5 : Dynamique naturelle des peuplements forestiers et sylviculture proposée pour la Pessière à mousse et la Sapinière à bouleau blanc de l'Ouest du Québec d'après Bergeron *et al.* (1999 et 2002).

Annexe 2

Annexe 2 : Personnalités marquantes dans l'évolution des principaux courants de pensées en sylviculture (d'après Schütz, 1990)

Les précurseurs :

1664-Evelyn, J.	Silva : or a discourse of forest trees and the propagation of timber in His Majesty's Dominions
1755-Duhamel de Monceau, H.L	Traité des arbres et arbustes qui se cultivent en France en pleine terre
1791-Varenne de Fenille, P.C.	Observations sur l'aménagement des forêts
1791-Hartig, G.L.	Anweisung zur Holzzucht für Förster
1817-Cotta, J.H.	Anweisung zum Waldbau
1828-Kasthofer, K.A.	Der Lehrer im Walde
1837-Lorentz, B et A. Parade	Cours élémentaire de culture des bois
1855-Burckhardt, H.	Säen une Pflanzen nach forstlicher Praxis
1860-Pfeil, W.	Die deutsche Holzzucht

La sylviculture proche de la nature :

1880-Gayer, K.	Der Walbau
1900-Engler, A.	Wirtschaftsprinzipien für die natürliche Verjüngung der Waldungen mit besonderer Berücksichtigung des verschiedenen Standortsverhältnisse der Schweiz
1922-Möller, A.	Der Dauerwaldgedankte
1924-Rubner, K.	Die pflanzengeographischen Grundlagen des Waldbaus
1950-Tschermak, L.	Waldbau auf pflanzengeographish-ökologisher Grundlage

1951-Leibundgut, H.	Der Wald, eine Lebensgemeinschaft
1981-Leibundgut, H.	Die natürliche Walverjüngung

L'éclaircie comme moyen d'améliorer la production

1800-Reventlow, C.D.F.	Grundsätze und Regeln für den zweckmässigen Betrieb der Forsten
1878-Bagnéris, G.	Manuel de sylviculture
1885-Borggreve, B.	Die Holzzucht. Ein Grundriss für Unterricht und Wirtschaft
1907-Michaelis, C.	Gute Bestandespflege und Starkholzzucht
1924-Engler, A.	Die Hochdurchforstung
1925-Philipp, K.	Richtlinien für Erziehung une Verjüngung der Hochwaldungen in Baden
1934-Schädelin, W.	Die Durchforstung als Auslese und Veredlungsbetrieb höchster Wertleistung

Le jardinage

1820-Dralet, M.	Traité des forêts d'arbres résineux sur les montagnes de France et terrains adjacents
1884-Gurnaud, A.	La sylviculture française et la méthode du contrôle
1901-Biolley, H.	Le jardinage cultural
1914-Balsiger, R.	Der Plenterwald une seine Bedeutung für dir Forswirtschaft der Gegenwart
1937-Ammon, W.	Das Plenterprinzip in der schweizerichen Forstwirtschaft

Annexe 3

Annexe 3 : Principaux principes d'aménagement du *Dauerwald* (Helliwell, 1997).

1) Éviter de faire de la coupe totale
2) Tous les arbres qui poussent vigoureusement sont conservés, alors que les autres sont prélevés
3) Abandon des concepts de classe d'âge et de rotation
4) L'obtention de la régénération n'est pas le facteur principal, elle ne doit pas être le facteur qui conduit le système
5) Abandon des calculs complexes pour élaborer le prélèvement annuel, à la faveur de la détermination de l'accroissement par période d'inventaire.