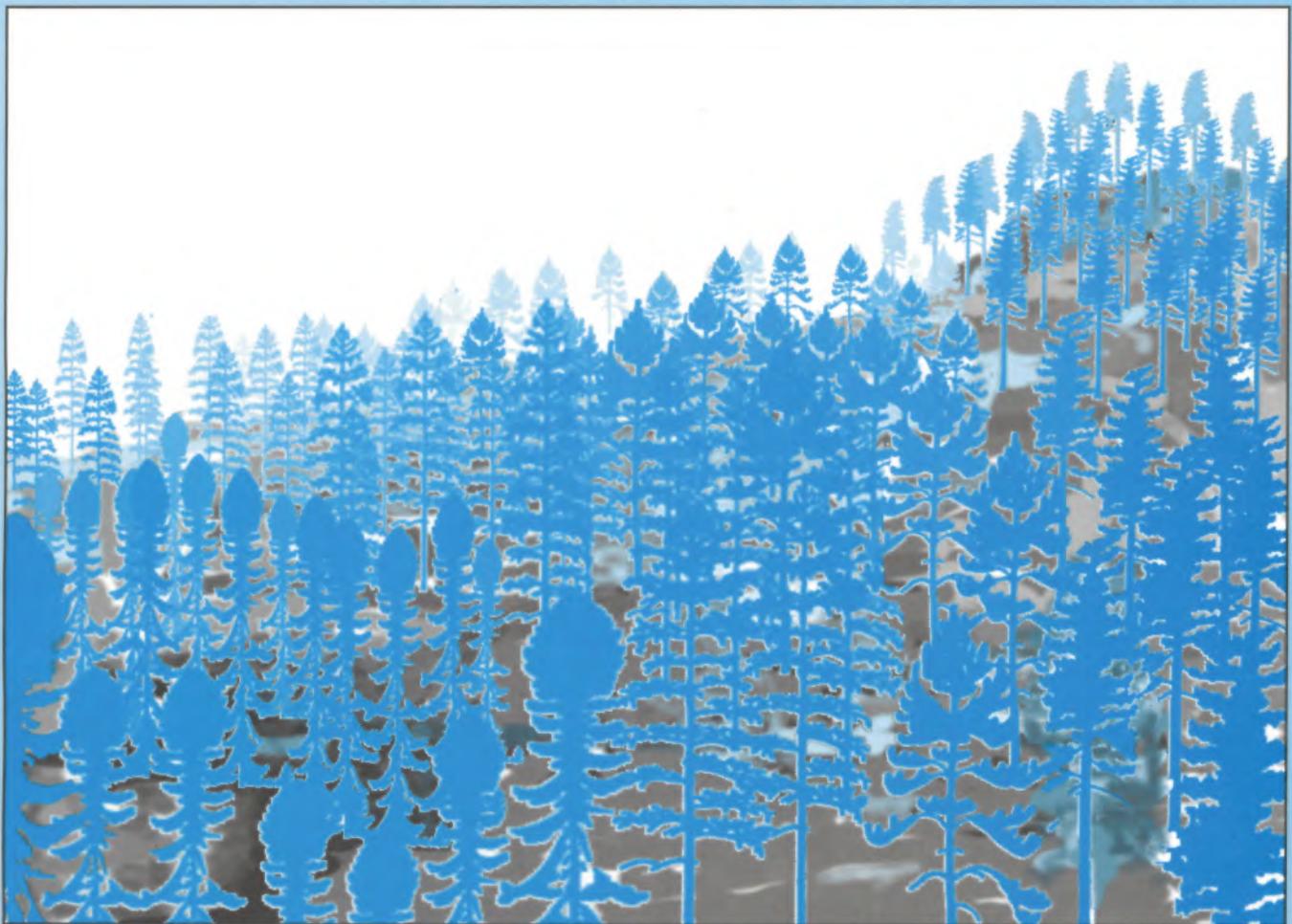


Rapports présentés dans le cadre de l'atelier sur les Stratégies d'amélioration génétique d'espèces d'arbre importantes au Canada

Fredericton, Nouveau-Brunswick
août 18, 1993

Compilé par
Y.S. Park et G.W. Adams

Ressources naturelles Canada ■ Rapport d'information M-X 186F



Ressources naturelles Canada
Natural Resources Canada

Canada

Rapports présentés dans le cadre de l'atelier sur les
STRATÉGIES D'AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE D'ESPÈCES
D'ARBRE IMPORTANTES AU CANADA

Fredericton, Nouveau-Brunswick
18 août 1993

Compilé par
Y.S. Park et G.W. Adams

Rapport d'information M-X-186F

Ministère des Ressources naturelles du Canada
C.P. 4000, Fredericton (N.-B.) Canada E3B 5P7

1993

*Stratégies d'amélioration génétique
d'espèces d'arbre importantes au Canada*

© Ministère des Ressources naturelles

ISSN 1195-3802

ISBN 0-662-98801-9

Catalogue n° Fo46-19/186F

Des exemplaires de ce document peuvent être obtenus gratuitement en quantité limitée.

Ressources Naturelles Canada
C.P. 4000
Fredericton (N.-B.)
Canada E3B 5P7
(506) 452-3500

Des copies ou des microfiches de cette publication peuvent également être obtenues auprès de l'organisme suivant :

Micromedia Ltée
Place du Portage
165, rue Hôtel-de-Ville
Hull (Québec)
J8X 3X2

An English copy of this report is available upon request.

Résumé

Des programmes et des stratégies d'hybridation pour les essences principales au Canada sont présentés, à savoir le Douglas taxifolié (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb), les essences de mélèze (*Larix* spp.), et l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). Les stratégies d'hybridation proposées pour ces essences incorporent plusieurs concepts et techniques nouveaux pour des plans d'hybridation des générations avancées.

Abstract

Breeding programs and strategies for four major tree species of Canada are presented, including Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), jack pine (*Pinus banksiana* Lamb), the larch species (*Larix* spp.), and black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). The proposed breeding strategies for the species incorporate several new concepts and techniques for advanced-generation breeding plans.

Avant-propos

Vers la fin des années 1970, des programmes opérationnels d'amélioration génétique des arbres ont été lancés dans toutes les régions du Canada. Ces programmes sont fréquemment réalisés en coopération avec des organismes gouvernementaux, des associations industrielles et des universités. Ils visent essentiellement les principales essences commerciales de la région; l'amélioration génétique des semences est actuellement réalisée à des fins de reforestation. De plus, nombre de ces programmes se lancent en ce moment dans des plans d'amélioration génétique de générations avancées.

Au cours de la 24^e assemblée de l'Association canadienne pour l'amélioration des arbres, les problèmes que soulève l'amélioration génétique des générations avancées seront évalués dans le cadre de l'étude du thème général «Les forêts de l'avenir : options et rentabilité». S'il est donc prévu que le colloque soit consacré à un thème plus général, nous avons estimé que la période était bien choisie pour organiser un atelier en vue de nous informer des programmes et des stratégies d'amélioration génétique consacrés aux essences importantes au Canada. En raison du manque de temps, nous avons dû nous limiter à quatre grandes essences : le Douglas taxifolié, le pin gris, les essences de mélèze et l'épinette noire. Les auteurs nous exposent les grandes lignes des programmes d'amélioration génétique de générations avancées des différentes essences. Ces stratégies d'amélioration génétique incorporent divers nouveaux concepts ou techniques, comme le recours aux techniques modifiées de tests génétiques, la gestion de la population du programme au moyen de lignes secondaires et le recours aux techniques de multiplication végétative. Toutes ces stratégies d'amélioration génétique visent à favoriser un gain génétique optimal compte tenu des réalités économiques et des limites biologiques.

Nous admettons également que les plans d'amélioration génétique exposés ont trait à des programmes précis; il conviendra donc peut-être d'actualiser ces documents au fur et à mesure où nous acquerrons de l'expérience et où nous parviennent les résultats des programmes. Après la présentation des quatre grands rapports, nous avons prévu une discussion des questions et problèmes que soulèvent ces programmes d'amélioration génétique des arbres. L'objectif de cet atelier consiste à échanger des idées et des opinions sur le plan de la mise en oeuvre des programmes opérationnels d'amélioration génétique des générations avancées.

Nous remercions les auteurs et les réviseurs pour leur contribution. Des notes de révision complémentaires ont été ajoutées par D.P. Fowler et C.B. Talbert. Nous remercions Caroline Simpson qui s'est chargée de la rédaction et de l'édition de ce rapport.

Yill Sung Park
Ressources naturelles Canada
Fredericton (N.-B.)

Greg Adams
J.D. Irving Limited
Sussex (N.-B.)

Table des matières

	Page
Résumé	iii
Avant-propos	iv
Programmes et stratégies d'amélioration génétique du Douglas taxifolié en Amérique du Nord <i>J.H. Woods</i>	1
Stratégie d'amélioration génétique de générations avancées du pin gris en Ontario <i>D. Joyce et P. Nitschke</i>	15
Étude des programmes et stratégies d'amélioration génétique des essences de mélèze <i>G. Vallée et A. Stipanovic</i>	29
Stratégie actualisée d'amélioration génétique de l'épinette noire (<i>Picea Mariana</i> (Mill.) B.S.P.) au Nouveau-Brunswick <i>Y.S. Park, J.D. Simpson, G.W. Adams, E.K. Morgenstern et T.J. Mullin</i>	47

PROGRAMMES ET STRATÉGIES D'AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE DU DOUGLAS TAXIFOLIÉ EN AMÉRIQUE DU NORD

Jack H. Woods

Cowichan Lake Research Station, British Columbia Forest Service
C.P. 335, Mesachie Lake (C.-B.) V0R 2N0

Résumé

Nous avons évalué et comparé les programmes d'amélioration génétique du Douglas taxifolié dans l'ouest de l'Amérique du Nord. Les programmes en vigueur sont basés sur une ou deux stratégies de base pour la première génération; croisements diallèles ou test de descendance en pollinisation libre. La superficie des secteurs d'amélioration génétique varie sensiblement selon les programmes. Des stratégies de générations avancées ont été conçues et sont actuellement en cours dans le cadre de certains programmes. Lorsque la mise au point de ces stratégies sera terminée, des stratégies d'hybridation complémentaires seront mises en oeuvre afin d'estimer la valeur reproductive des parents de seconde génération indépendamment du matériel destiné à l'analyse de régression progressive. L'intégration des programmes d'amélioration génétique au niveau des plantations opérationnelles constitue un facteur important des stratégies d'amélioration génétique, particulièrement en ce qui concerne la structure des lignes secondaires.

Introduction

Le Douglas taxifolié (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), est présent à l'état naturel dans de nombreuses régions de l'ouest de l'Amérique du Nord; son aire de répartition s'étend du 55^e parallèle au centre de la Colombie-Britannique jusqu'au 20^e parallèle au Mexique (Harlow et Harrar, 1969). C'est l'une des essences forestières les plus importantes sur le continent.

Le bois du Douglas taxifolié est un bois d'oeuvre résistant dont la valeur est élevée pour les débits de dimensions spécifiées. Les premières activités d'exploitation et de reforestation réalisées sur la côte ouest de la C.-B., de l'État de Washington et de l'État d'Oregon visaient le pin Douglas. Il en est résulté des recherches en génétique dès 1912 (Munger et Morris, 1936) dans l'État de Washington et en Oregon. En C.-B., les travaux d'autofertilisation et de croisements à large spectre ont démarré au début des années 1950 (Orr-Ewing, 1965; Orr-Ewing *et al.*, 1972). Ces premières études ont eu une influence déterminante sur la compréhension de la

génétique du Douglas taxifolié mais elles ont été d'un intérêt limité en ce qui a trait aux efforts ultérieurs de production de matériel de reforestation amélioré sur le plan génétique.

Les efforts visant à expliquer la génécologie du Douglas taxifolié déployés en vue d'appuyer les programmes de reforestation ont débuté dans les années 1950 (Schmidt, 1973; Ching et Hinz, 1978; Illingworth, 1978; Rehfeldt, 1989; Sorensen, 1983; Campbell, 1986). Ces travaux ont amélioré sensiblement la compréhension de la génétique du Douglas taxifolié et influencé les stratégies des programmes d'amélioration génétique des différents secteurs de l'aire de répartition.

Les participants aux programmes

Les programmes de vergers producteurs de graines et de vergers de reproduction relatifs au Douglas taxifolié s'articulent autour d'une diversité d'organismes et de coopératives, qui collaborent à des degrés divers. En C.-B., la majorité des terres forestières appartiennent au gouvernement et les forestières exploitent les terres en vertu de

permis. Vu que les terres appartiennent au gouvernement, des coopératives se sont créées au niveau des zones côtières et de l'intérieur de la province; elles regroupent tous les organismes autour d'un ensemble commun d'objectifs et de priorités. Le British Columbia Forest Service (BCFS) exploite des programmes d'amélioration génétique du Douglas taxifolié distincts sur les secteurs de la côte et ceux de l'intérieur, par le biais des coopératives.

Dans l'ouest des États de Washington et de l'Oregon, la proportion de terres appartenant à des intérêts privés est beaucoup plus élevée qu'en C.-B. La plupart des forestières et des organismes gouvernementaux qui participent à des activités d'amélioration génétique du Douglas taxifolié utilisent le canal de la Northwest Tree Improvement Cooperative (NWTIC), qui regroupe 35 organismes. Le United States Forest Service (USFS), le Bureau of Land Management, et le Washington State Department of Natural Resources sont membres de la NWTIC, mais ils réalisent des tests indépendants lorsqu'ils sont propriétaires uniques d'un secteur d'amélioration génétique.

La société Weyerhaeuser Company est un autre protagoniste important. Elle possède 1,1 million d'hectares de terres dans l'ouest des États de Washington et de l'Oregon, terres qui conviennent essentiellement à la culture du Douglas taxifolié; elle participe à un programme agressif d'amélioration depuis la fin des années 1960.

Dans l'est des États de Washington, de l'Idaho et dans l'ouest du Montana, les activités d'amélioration génétique des arbres sont coordonnées par l'Inland Empire Tree Improvement Cooperative (IETIC). Les tests sont effectués essentiellement par l'USFS en coopération avec d'autres intervenants, dont le degré de participation varie selon les besoins et les objectifs. L'établissement de vergers producteurs de graines est réalisé indépendamment par les coopérants.

Secteurs d'amélioration génétique

La taille des secteurs d'amélioration génétique des programmes des secteurs côtiers des É.-U. et de la C.-B. est fort différente. Dans les régions côtières de C.-B., la sélection des souches parentales et la planification des vergers producteurs de graines ont été basées à l'origine sur les aires de semence correspondant aux grandes régions climatiques. Un certain nombre d'études ont été réalisées afin d'étudier les différences reliées aux sources, ce qui inclut les croisements à large spectre réalisés par Orr-Ewing *et al.* en 1972, les premiers tests de provenance réalisés par Ching (Ching et Hinz, 1978), suivis des tests de provenance complémentaires réalisés par Schmidt et Illingworth (Illingworth, 1978). Ces activités menèrent à la conclusion que les différences génétiques reliées aux sources n'étaient pas évidentes au niveau des populations côtières et que les problèmes d'adaptation ne semblaient pas réels, sauf dans le cas d'utilisation de sources de l'intérieur.

À l'heure actuelle, les données des tests de provenance et des tests de descendance justifient l'utilisation d'une zone maritime unique de grande dimension (à l'ouest de la chaîne côtière, à moins de 650 m d'altitude et sur des sites présentant des conditions écologiques favorables au Douglas taxifolié). Cette zone s'étend entre 48,4 degrés de latitude au sud de l'île de Vancouver et 50,7 degrés. Dans la zone intermédiaire, entre le climat de l'intérieur et celui de la côte (chaîne de montagnes côtières), le mouvement des semences est plus restrictif étant donné que les données disponibles susceptibles de justifier une autre formule sont rares.

Dans l'ouest des États de Washington et de l'Oregon, les études de provenance ont débuté dès 1912 (Munger et Morris, 1936). D'autres travaux furent réalisés par la suite par Ching (Ching et Hinz, 1978), Campbell, Sorensen (Campbell, 1986; Campbell et Sorensen, 1978), ainsi que par la Weyerhaeuser Company. L'aire

Tableau 1. Statistiques comparatives relatives aux cinq principaux programmes d'amélioration génétique du Douglas taxifolié dans l'ouest de l'Amérique du nord.

Activité	Programme ^a				
	Côte C.-B.	Weyco.	NWTIC ^b	Intérieur C.-B.	IETIC ^c
Nombre d'aires d'amélioration génétique	2	6 ^d	73	8	13
Nombre de parents de 1 ^{ère} génération utilisés pour le test	560	2700	20569	1700	2855 ^e
Types des tests de 1 ^{ère} génération	Diallèle, P.L., Factoriel	Diallèle, Polycross, Paire un.	P.L., Paire un.	P.L.	P.L.
Nombre de tests de 1 ^{ère} génération	130	400	630	32	41
Traits primaires	Volume, densité	Volume, forme	Volume, forme	Volume	Gel, volume
Traits secondaires	Forme, gel	Densité, gel	Densité	Densité, gel	Ravageurs, forme

- a. Décrit uniquement les principaux programmes par regroupement administratif ou organisme; certains programmes sont exclus, y compris les programmes USFS indépendants des coopératives.
b. Source : 1992 Progress Report for Local Cooperative Programs préparé par L. Ray, Daniels et Associés, 1143 W. Roanoke St., Centralia, WA. 98531.
c. Source : Inland Empire Tree Improvement Cooperative, Sixteenth Progress Report, par L. Fins, M. Rust et C. Amonson, Univ. of Idaho, Moscow, ID. 83843.
d. Effectueront le regroupement de certaines aires pour les générations avancées.
e. Le chiffre réel est légèrement inférieur, vu que certaines familles ont été plantées sur des superficies supérieures à une zone.

de répartition du Douglas taxifolié dans l'ouest des États de Washington et de l'Oregon est passablement plus vaste que celle de la C.-B. (7 degrés de latitude de plus); de plus, elle inclut une vaste gamme de types climatiques et physiographiques. Les résultats des premières études de provenance réalisées ont influencé le Western Forest Tree Seed Council qui a décidé d'adopter une stratégie conservatrice de délimitation des aires de semence (source anonyme, 1966). Cette stratégie a été appuyée par les travaux de génécologie à court terme réalisés par Campbell et Sorensen, particulièrement dans le sud-ouest de l'Oregon. Les résultats de Weyerhaeuser indiquent toutefois que l'élargissement du mouvement de familles choisies est acceptable dans les climats tempérés (Stonecypher, 1990). À l'heure actuelle, certains membres du NWTIC préconisent un regroupement de certains

secteurs d'hybridation de manière à réduire le coût des tests.

Les généticiens de Weyerhaeuser ont créé à l'origine six aires de semence à faible altitude (inférieure à 650 m) dans l'ouest des États de Washington et de l'Oregon, de manière à gérer le déploiement du matériel de reproduction amélioré sur leurs terres. Le déploiement des familles de première génération demeure essentiellement limité à ces zones. Des travaux sont également en cours afin de dépister les parents possédant des caractères d'adaptabilité et d'établir la corrélation entre ces données et les risques relatifs à différents sites (Wheeler *et al.*, 1990). Au fur et à mesure où s'améliore l'exhaustivité des données disponibles, la stratégie de déploiement sera de plus en plus centrée sur l'appareillage des familles et des sites, autant à l'intérieur de chaque secteur

qu'entre des zones différentes, mais en poursuivant le contrôle des «distances environnementales» admissibles entre le site d'origine et le site de plantation.

La génécologie du Douglas taxifolié de l'intérieur aux É.-U. a fait l'objet d'études intensives de Rehfeldt (1989). Ses travaux ont abouti à la délimitation de secteurs d'amélioration génétique en fonction de critères d'altitude et de critères géographiques. Les programmes de l'IETIC suivent les lignes directrices de Rehfeldt.

Dans l'intérieur de la C.-B., les travaux réalisés pour préciser des aires d'amélioration génétique avant 1980 étaient limités. La délimitation des aires prévues pour l'établissement de vergers producteurs de graines et de vergers expérimentaux a été basée sur les résultats des travaux de Rehfeldt et de la classification biogéoclimatique (Pojar *et al.*, 1987). À l'heure actuelle, on recense huit aires d'amélioration génétique et des tests ont été réalisés sur chacun de ces secteurs.

Stratégies d'amélioration génétique

Les stratégies d'amélioration génétique diffèrent selon les programmes en raison de l'âge du test, des structures de la coopérative et des objectifs de l'organisme. Le tableau 1 illustre les différences entre programmes en fonction de plusieurs critères importants.

Traits

Le Douglas taxifolié est recherché pour le placage et les débits de dimensions spécifiées. Il est également utilisé dans le secteur des pâtes et papiers mais les caractéristiques de ses fibres ne sont pas aussi prisées que celles de nombreuses autres espèces qui partagent la même aire de répartition. Les déprédateurs soit notamment le pourridié agaric (*Phellinus weirii* et *Armillaria ostoyae*), la chenille à houppe du Douglas taxifolié (*Orgyia pseudotsugata*), la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura* spp.), et la

rouille des aiguilles du Douglas taxifolié (*Rhabdocline pseudotsugae* causent des problèmes dans certains secteurs. Toutefois, on considère généralement que la lutte contre ces déprédateurs est plus efficace par voie de soins sylvicoles que par voie d'amélioration génétique. Aussi, à l'exception du programme IETIC, on a mis l'accent sur les caractères de rendement (hauteur ou volume de la tige), et sur les caractères de qualité (densité du bois, forme de la tige). La résistance au gel est également prise en compte, dans les cas pertinents. En raison des climats plus rigoureux qui le caractérisent, le programme IETIC accorde une importance accrue aux caractères d'adaptabilité, notamment la résistance au gel et la vulnérabilité à la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

Sélection des parents de première génération

Les populations de base de tous les programmes d'amélioration génétique ont été sélectionnées à partir de peuplements naturels des aires d'amélioration génétique. Le programme côtier de C.-B. incluait également des arbres de l'ouest de l'État de Washington. Les critères de sélection variaient, mais en règle générale, les souches parentales de base étaient sélectionnées au sein d'un peuplement équié en fonction de critères de forme et de taille. La couverture géographique de la zone constituait une priorité et on évita la coascendance en ménageant une distance minimale entre les arbres. Les premiers programmes côtiers accordèrent une grande importance à la sélection des populations de base, mais on estime que les gains obtenus furent limités en raison de la faible héritabilité des différents arbres du peuplement naturel. En conséquence, les programmes ultérieurs ont consacré relativement moins d'importance à ce volet.

Amélioration génétique et tests de première génération

Les premières stratégies de test varient selon les programmes côtiers en fonction du matériel

disponible. Sur la côte de C.-B., la sélection intensive de souches parentales et les banques de clones ont fourni du matériel pour les accouplements contrôlés. Au début des années 1970, un programme d'accouplement par demi-diallèle de six arbres (sans autopollinisation) a été lancé afin d'estimer les aptitudes générales à la combinaison des souches parentales (AGC) ainsi que les composantes de la variance, et de préparer du matériel pour les sélections de seconde génération. À partir de 1975, les diallèles furent regroupés en séries annuelles et chaque série fut plantée sur 11 sites expérimentaux. Le nombre élevé de sites reflète l'incertitude relative aux caractéristiques du génotype liées aux interactions de l'environnement. Trois cent soixante-dix parents font actuellement l'objet de tests sur 88 sites expérimentaux. Un groupe complémentaire de 161 parents de l'État de Washington font l'objet de tests de descendance en pollinisation libre sur cinq sites différents. En combinaison avec divers autres tests, ces tests portent donc au total sur environ 560 souches parentales dans la zone côtière (zone de semence maritime).

La société Weyerhaeuser Company a débuté ses tests en 1973, par accouplements polycross et accouplements par paires uniques; toutefois, la société est passée aux demi-diallèles de six arbres en 1980. Le programme portait sur six aires d'amélioration génétique et à l'heure actuelle environ 2 700 souches parentales de Douglas taxifolié situées à faible altitude font partie du test. Les objectifs visés sont similaires à ceux du programme côtier de la C.-B., mais on teste généralement chaque parent sur trois ou quatre sites, puis on complète ces tests par des études expérimentales extensives portant sur plusieurs zones.

À l'exception des programmes côtiers de C.-B. et du programme Weyerhaeuser, pratiquement tous les tests de première génération réalisés dans le cadre d'autres programmes étaient des tests en pollinisation libre. Cette stratégie reflète le désir de

réunir rapidement les données AGC, à des fins d'établissement de vergers ou de sélection. Comme l'indique le tableau 1, le programme de la NWTIC constitue un effort massif, 73 aires d'amélioration génétique et 20 569 parents étant visés par le test. Les programmes de l'intérieur sont également le cadre d'efforts notables, les programmes du B.C. Forest Service et de l'IETIC portant respectivement sur 1 700 et 2 800 souches parentales.

La conception des tests de descendance diffère quelque peu entre les programmes de première génération. À l'exception de certains tests USFS réalisés au sein de l'IETIC, tous les programmes ont opté pour des aires de coupe homogène au sein du secteur d'amélioration génétique. La préparation des sites est généralement minime et les arbres sont plantés en ligne sur des parcelles non contiguës ou de petite taille. La lutte contre les mauvaises herbes et les brouilles se fait selon différentes méthodes de manière à permettre aux arbres de croître librement. Au sein de l'IETIC, certains tests sont réalisés selon la description qui précède, mais l'USFS utilise également des tests de sélection précoce de foresterie rurale (Carlson, 1990) avec préparation intensive du site.

Interprétation et déploiement des résultats des tests de première génération

La plupart des programmes vont, si ce n'est déjà fait, constituer des vergers à graines de semis ou des vergers à graines clonales de première génération non testés. La décision d'utiliser des semis pour certains des premiers vergers côtiers fut prise en raison de la mortalité élevée imputable à l'incompatibilité de greffe (Copes, 1982). Au sein de l'IETIC, afin d'éviter les problèmes de culture reliés aux greffes et de tirer profit des données des premiers tests, certains coopérants ont pris la décision stratégique d'utiliser des semis améliorés provenant de meilleures familles. Pour tous les programmes côtiers, les problèmes d'incompatibilité des greffe sont aujourd'hui

limités à des niveaux acceptables grâce à l'utilisation de porte-greffes compatibles.

Les décisions de créer des vergers non testés sur la côte étaient justifiées dans certains cas par l'espoir de gains génétiques à partir de la sélection de souches parentales au niveau des peuplements naturels. Au fur et à mesure où les données relatives à la valeur reproductive des souches parentales deviennent disponibles, nombre de ces vergers originaux font l'objet d'épurations ou sont remplacés, et les techniques de gestion de vergers du type pollinisation de masse supplémentaire ou accouplements contrôlés sont mises à profit de manière à augmenter les gains réalisés.

Dans l'intérieur de la C.-B., l'établissement de vergers est retardé en attendant les résultats des tests de 6 ans. Lorsque ces données seront disponibles, les meilleurs clones des tests seront placés dans un verger, soit entre 50 et 75 p. 100 des clones de meilleure qualité. D'autres tris seront réalisés au fur et à mesure où vieillissent les arbres des tests.

Weyerhaeuser Company a adopté une stratégie plus agressive afin d'obtenir les meilleurs gains génétiques possibles en ce qui concerne les caractères de croissance et de qualité sur la base des résultats de leurs tests (généralement au bout de la 8^e année). En utilisant une technologie conçue et mise au point pour la production de boutures de racines, la société est en mesure de réaliser l'amplification végétative des semences correspondant à un croisement contrôlé des meilleurs souches parentales. L'entreprise recueille et déploie également des semences de vergers à pollinisation éolienne par souches parentales femelles.

Sélection de populations pour la reproduction de générations avancées

Les différents programmes d'amélioration génétique sont rendus à des étapes de

développement variable; de plus, l'importance accordée aux stratégies de sélection de générations avancées a également varié. Le programme côtier BCFS et le programme Weyerhaeuser s'appuient aujourd'hui sur des stratégies parfaitement au point dont la mise en oeuvre se déroule à l'heure actuelle; en ce qui concerne les programmes de la NWTIC, de l'IETIC et des secteurs intérieurs du BCFS, la mise au point des stratégies respectives n'est pas encore terminée.

À l'heure actuelle, le programme de l'intérieur du BCFS prévoit sélectionner les parents représentés dans les tests en pollinisation libre (sélections vers l'amont) en se basant sur les hauteurs au bout de 6 ans. Une évaluation ultérieure de la densité du bois permettra un tri indépendant des clones dont les valeurs reproductives sont faibles.

Au sein de l'IETIC, l'USFS utilise des essais de sélection précoce afin de choisir la population sur la base d'un indice d'adaptation de la phénologie des pousses. Cette stratégie reflète les conditions hautement variables au sein de cette zone ainsi que les problèmes dus aux dégâts du gel. Des stratégies de tests et d'amélioration génétique de générations avancées font actuellement l'objet de recherches et on espère que les sélections effectuées à partir de ce matériel seront basées sur des caractéristiques de rendement et éventuellement, sur la résistance aux maladies ou aux insectes.

Au sein de la structure organisationnelle de la NWTIC, 12 coopératives de seconde génération ont été constituées. Les plans et l'âge des tests diffèrent légèrement selon les coopérateurs et selon les secteurs d'amélioration génétique. Toutefois, les populations d'amélioration génétique sont obtenues essentiellement par sélection en aval au niveau des tests de descendance en pollinisation libre en cours. Les sélections sont basées sur le volume des tiges et la densité du bois, et des tris indépendants sont basées sur la forme des tiges.

À ce jour, les 12 programmes de seconde génération planifient des tests afin de permettre l'expansion de la surface des secteurs de reproduction et la fusion des programmes réalisés simultanément dans le même secteur géographique.

Les programmes des secteurs côtiers du BCFS et de la Weyerhaeuser Company réalisent à l'heure actuelle la sélection des populations de seconde génération. En C.-B., les sélections proviennent essentiellement des séries de tests diallèles alors que les sélections de la Weyerhaeuser Company sont effectuées à partir d'accouplement à paires uniques et polymix. Le recours aux tests diallèles sera intensifié au cours des années à venir. Il existe de nombreuses similitudes entre les stratégies de générations avancées de la Weyerhaeuser Company et celles du BCFS; toutefois, on constate certaines différences importantes qui ont trait essentiellement aux objectifs de l'organisme et à la structure administrative de chaque groupe.

Pour la plupart de ces séries de tests de première génération, Weyerhaeuser a créé des parcelles témoins de manière à disposer d'une base commune de comparaison des sélections. Des analyses ont été réalisées afin d'estimer les valeurs d'indices de reproduction et de sélection de tous les candidats de la sélection en aval, ainsi que de leurs parents, pour toutes les séries de tests visés par cette vérification commune. Les caractères de sélection actuels incluent le volume des tiges, le développement des branches ramicornes, la sinuosité des tiges et la densité du bois, alors que la résistance au gel est prise en compte lors de l'étape de déploiement. Une population «principale» a été constituée en privilégiant les critères de volume et de qualité, alors que des populations plus réduites d'«élite» sont actuellement sélectionnées essentiellement sur la base des critères de densité du bois et d'absence de défauts. Les candidats sont individualisés sur papier puis vérifiés sur le terrain. Les sélections familiales et intrafamiliales sont utilisées pour les

critères de volume, de développement des branches ramicornes et de sinuosité. Une stratégie de sélection massale est utilisée pour la densité du bois. La sélection en aval de ces tests de première génération progresse et l'objectif final consiste à sélectionner 150 arbres pour chacun des deux secteurs originaux de l'Oregon et 300 pour les quatre secteurs originaux de l'État de Washington.

Le programme d'amélioration génétique du secteur côtier de C.-B. effectue également une sélection basée sur une diversité de projets de tests. Le recours à des objectifs de déploiement et des stratégies d'accouplement qui diffèrent de ceux de la Weyerhaeuser permet de réduire la nécessité de traduire les estimations de la valeur reproductive et de la valeur d'indice de sélection en fonction d'une base commune. La plupart des sélections sont réalisées à partir des séries de tests diallèles en utilisant un indice basé sur le volume des tiges et la densité du bois des arbres de 12 ans. Une liste abrégée des arbres candidats est préparée à partir des valeurs d'indice de ces arbres et des objectifs de contrôle de coascendance au sein des lignes secondaires. Les candidats sont ensuite observés sur le terrain et certains arbres sont rejetés si leurs caractéristiques de forme ne sont pas satisfaisantes.

Les objectifs d'amélioration des caractères relatifs au programme des secteurs côtiers de la C.-B. consistent à mettre au point une essence type permettant la production à haut volume sans perte des qualités de densité du bois ou de forme des tiges. Les facteurs de pondération de l'indice utilisés pour la sélection des séries diallèles varient selon les écarts et les corrélations génétiques relatifs au volume et à la densité. Le recours à cette méthode relativement subjective vise à tirer le maximum de profit de chaque série diallèle afin d'atteindre l'objectif visé au niveau de la population globale.

Une population de sélection totale de 450 parents est prévue pour l'aire de semence des Maritimes. Cette population devrait être à nouveau réduite à la suite des tests réalisés sur toutes les sélections selon une procédure commune.

Modèles de croisement de générations avancées

Les différents programmes d'amélioration génétique peuvent être classés en deux groupes : 1) programmes incluant des tests de descendance en pollinisation libre, puis la sélection et l'accouplement en vue des tests de descendance biparentale et enfin la sélection de populations de sélection à généalogie contrôlée (programmes intérieur BCFS, IETIC, NWTIC et USFS), et 2) les programmes avec tests de descendance biparentale au niveau de la première génération, puis sélections en aval de la population de seconde génération (programmes secteur côtier BCFS, Weyerhaeuser). Étant donné que les programmes de la catégorie 1 sont moins avancés, les stratégies de déploiement, de tests et d'accouplements de générations avancées ne sont pas encore au point. Nous ne les étudierons pas de manière détaillée. Les programmes de la catégorie 2 incluent des plans plus avancés et nous allons étudier ces stratégies de manière plus approfondie.

Les programmes de la catégorie 1 effectuent des sélections en amont et en aval à partir des populations souches puis ils accouplent ces sélections en utilisant des modèles de tests du type diallele ou tests factoriels limités afin de mettre au point le matériel de descendance biparentale sur lequel seront effectuées les sélections infra-familiales. La structure de lignes secondaires sera imposée à ce stade. Les écarts des corrélations génétiques seront estimés au moyen de ce matériel de descendance biparentale et les décisions relatives aux tests et aux sélections ultérieures seront basées sur ces résultats. Les programmes de l'intérieur du BCFS et de la NWTIC effectuent des sélections basées essentiellement sur les

caractères de qualité et de rendement des tiges. Toutefois, en raison de leur environnement, les programmes IETIC continuent à accorder une grande importance aux caractères d'adaptabilité.

Les programmes de la catégorie 2 sont illustrés sur la figure 1. Les programmes des secteurs côtiers du BCFS et les programmes de la Weyerhaeuser suivent tous la procédure générale suivante : a) subdivision de la population de générations avancées en lignes secondaires; b) recours à des modèles d'accouplements complémentaires distincts afin d'estimer l'AGC parentale et de produire le matériel de généalogie contrôlée sur lequel sera effectuée la sélection de la génération suivante, c) réalisation des tests sur des parcelles expérimentales préparées et gérées de manière très rigoureuse sur le terrain, et d) réalisation d'une sélection principale basée sur la croissance et la qualité avec sélections connexes basées sur certains caractères précis. Les différences au niveau de la réalisation concrète de ces étapes découlent de la différence entre les stratégies de déploiement.

Weyerhaeuser sélectionne des populations de seconde génération de 150 à 300 individus par aire d'amélioration génétique. Au sein de chaque secteur original, les sélections sont divisées en deux lignes secondaires (huit lignes pour le secteur de regroupement de l'État de Washington). Les sélections relatives à chaque ligne secondaire sont divisées en quatre quartiles sur la base de leur classement. L'accouplement de descendance biparentale est réalisé en utilisant un modèle d'accouplement assortatif, c'est-à-dire pour lequel les croisements sont réalisés au niveau d'un quartile précis et non entre quartiles. Chaque arbre du quartile supérieur est croisé à quatre reprises, chaque arbre du quartile suivant à trois reprises et ainsi de suite. Les souches héréditaires relatives à différents caractères, à l'image de la qualité des tiges, de la densité du bois et de la tolérance au gel seront effectuées par croisement des meilleurs individus de lignes secondaires différentes. En règle générale,

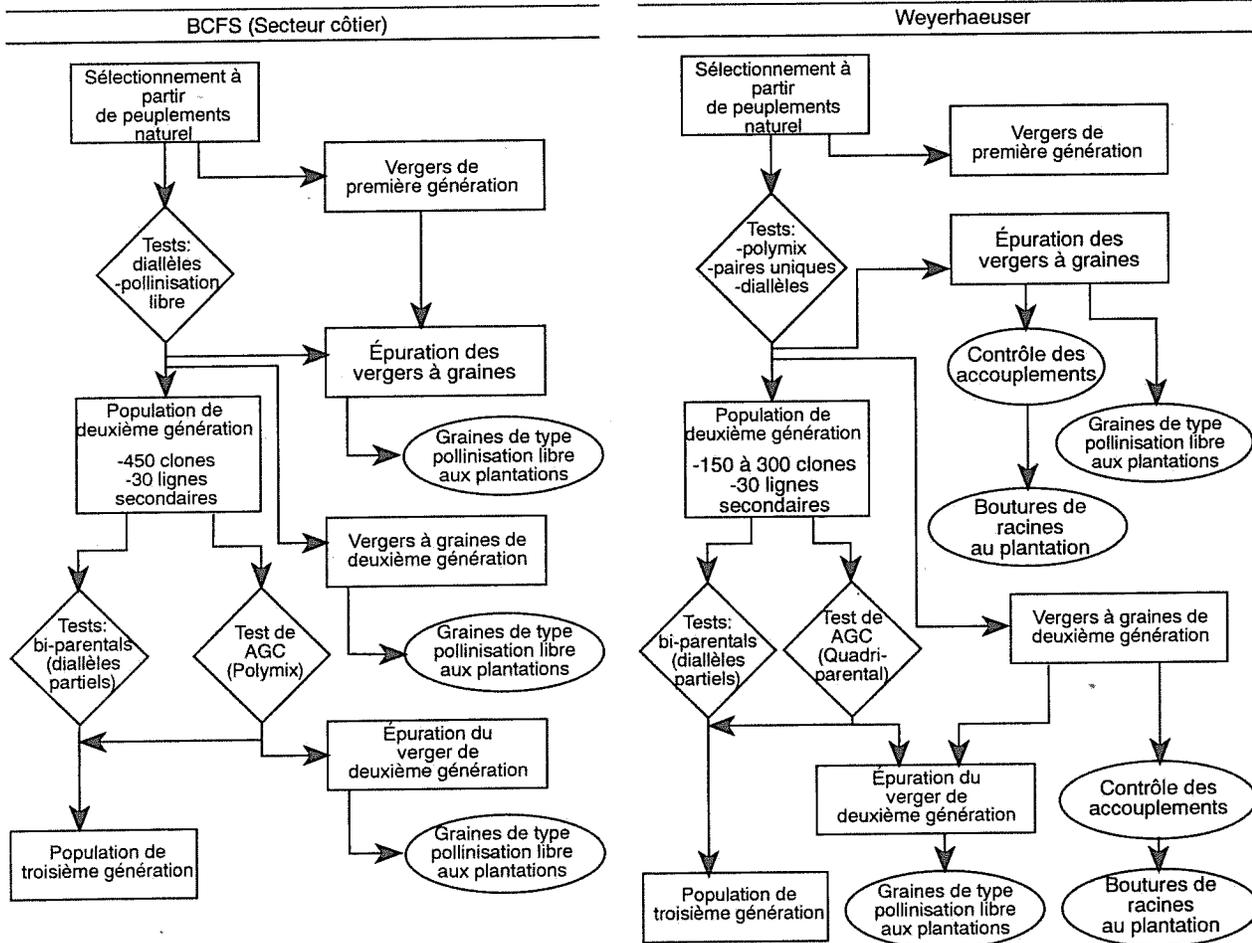


Figure 1 Organigramme des stratégies du programme d'amélioration génétique du Douglas taxifolié pour les secteurs côtiers mises en oeuvre par le British Columbia Forest Service et par la Weyerhaeuser Company.

toutefois, les lignes secondaires ne seront pas entrecroisées. Cette stratégie vise à optimiser les gains correspondant aux lignes secondaires, mais elle nécessite une stratégie de déploiement croisé contrôlé (nous l'évaluerons plus tard) afin d'éviter l'autofécondation des porte-greffes de la plantation.

Les accouplements relatifs aux tests d'AGC seront basés sur un modèle de test quadriparental, chaque sélection de la population d'amélioration génétique étant croisée comme mâle ou comme femelle avec les quatre testeurs communs (selon la solution la plus rapide compte-tenu du clone). Ces testeurs serviront à toutes les sélections d'une aire d'amélioration génétique ainsi qu'à la

réalisation des tests sur les générations futures. Le modèle de testeur utilisé permettra de réaliser tous les tests d'AGC sans la confusion reliée à la dépression de consanguinité.

Au sein du programme du BCFS, une population d'amélioration génétique d'environ 450 clones est sélectionnée puis subdivisée en lignes secondaires réduites de 12 à 16 clones. Toutes les coascendances sont contenues dans les lignes secondaires. Les clones de la population de sélection (pour la seconde génération et au-delà) sont accouplés en utilisant des polymix de 15 clones. Ces 15 clones ne sont pas reliés à d'autres clones de la population d'amélioration génétique et ils sont choisis précisément en fonction du fait que les valeurs reproductives de la densité du bois ou du volume des tiges sont voisines de zéro. Les valeurs reproductives de ces clones polymix sont pratiquement identiques, de manière à réduire l'incidence des écarts entre les succès obtenus au niveau des différentes combinaisons mâle-femelle. À l'image du programme Weyerhaeuser, la consanguinité n'influera pas sur les tests AGC.

Au sein des lignes secondaires, les croisements sont effectués selon un modèle d'accouplement circulaire par double paire. Les clones sont croisés sur une base assortative en fonction de leur valeur reproductrice estimée et les meilleurs clones sont utilisés pour un nombre plus élevé de croisements lorsque cela est possible. Le nombre de croisements sera plafonné de manière à limiter l'autofécondation des croisements à un chiffre inférieur à $F=0,125$ dans tous les cas. Cette restriction pourra être assouplie au niveau des générations futures, lorsque les répercussions de l'autofécondation seront mieux maîtrisées.

La plupart des lignes secondaires (environ 80 p. 100) sont sélectionnées dans le but d'optimiser le volume des tiges tout en assurant le respect des critères existants en matière de densité du bois et de forme de la tige. Les sélections découlant de groupes diallèles de première génération exceptionnels sur le plan de la densité du bois ou de

la forme des tiges seront placées dans des lignes secondaires distinctes afin de mettre au point des souches généalogiques spécialisées. Les sélections de ces lignes secondaires seront effectuées en fonction des caractères spécialisés pertinents, avec certains échanges entre les lignes secondaires principales, au fur et à mesure des générations. La limitation de la structure des lignes secondaires vise à contrôler l'autofécondation au niveau des populations de vergers producteurs de graines subséquents; elle fera toutefois l'objet de révisions lorsque des précisions seront disponibles sur les répercussions de l'autofécondation.

Stratégies de tests de générations avancées

Cette section sera limitée à la description des stratégies des programmes des secteurs côtiers du BCFS et du programme Weyerhaeuser. Les deux programmes utilisent des modèles de sélection complémentaires et ils réaliseront des tests distincts pour atteindre des objectifs qui leur sont propres. Les tests AGC des deux programmes seront réalisés sur des parcelles non contiguës de 3 ou 4 sites affichant les meilleures caractéristiques de qualité dans leur secteur respectif. Ces sites seront répartis à l'échelle de l'aire d'amélioration génétique. L'expérience indique que l'amélioration de la qualité des sites permet une accélération et une plus grande précision de l'individualisation du potentiel génétique; de plus, la corrélation avec les sites de qualité inférieure est satisfaisante. Enfin, la sinuosité des tiges et le développement des branches ramicornes sont plus apparents sur les secteurs dont l'indice est élevé et ils ne peuvent être évalués adéquatement sur les sites de qualité inférieure.

Les sites candidats seront évalués sur une base individuelle en ce qui concerne les besoins de préparation du site; toutefois, en général, des tests sont réalisés sur des secteurs libres de souches et de débris puis cultivés afin d'homogénéiser le sol. L'espacement sera inférieur à l'espacement

généralement utilisé pour la foresterie opérationnelle. Weyerhaeuser prévoit des espacements de 2x2 m et le BCFS des espacements de 1x1 m; toutefois ces chiffres pourront être modifiés selon le site. Des modèles d'intercroisement répétitif pourront être utilisés (modifications de Libby et Cockerham, 1980) afin de permettre l'éclaircissage. La corrélation entre les données initiales (3 ou 4 ans) de ce type de site et les données ultérieures (13 ans) relatives à des sites largement espacés est élevée autant au niveau du volume que de la densité du bois (données non publiées par le BCFS). Des vérifications types des peuplements naturels et des tests-croisements seront inclus pour dépister les clones.

En ce qui concerne le programme de la BCFS, l'éclaircissage sera réalisé 4 ans après l'ensemencement (après mesure de la hauteur et du diamètre), afin d'estimer l'indice AGC de densité du bois relatif au matériel éclairci.

Chacune des familles du modèle d'accouplement circulaire sera déployée sur deux parcelles de 25 arbres dans le cadre du programme BCFS. Ils fourniront le matériel nécessaire aux sélections infra-familiales (sélections en aval) en vue de constituer la génération suivante.

Les familles de descendance biparentale du programme Weyerhaeuser seront plantées selon un modèle de parcelles non contiguës sur les quatre sites, avec appariement du test AGC, lorsque cela est possible. Le test sera émaillé de parcelles de vérification à des fins de démonstration. On prévoit pouvoir tenir compte des aptitudes combinatoires spécifiques pour le choix des familles de descendance parentale, qui seront déployées au niveau des parcelles non contiguës et non des parcelles de blocs de familles. On estime que la perte d'efficacité relative à la sélection en aval sera minimale lorsque la sélection et la gestion du site sont efficaces.

Déploiement des génotypes améliorés

L'ensemble des programmes du Douglas taxifolié utilisent ou prévoient utiliser des vergers producteurs de graines afin de déployer le matériel amélioré. Ces vergers revêtent diverses formes, selon l'étape à laquelle sont rendus les divers programmes ainsi que selon le volume de données disponibles pour la sélection. De plus, la gestion varie selon les objectifs de l'organisme; elle va d'activités limitées en dehors de la collecte des cônes à une gestion intensive avec pollinisation de masse supplémentaire, croisements contrôlés et irrigation générale à des fins de retard et de compression de la phénologie. La récolte des graines varie également d'une récolte en vrac à la gestion de banques de semences distinctes pour chaque parent femelle.

Les stratégies de déploiement de générations avancées diffèrent entre les programmes du BCFS et le programme Weyerhaeuser; elles justifient la plupart des différences entre les stratégies d'amélioration génétique. Weyerhaeuser prévoit utiliser le meilleur matériel disponible du programme d'amélioration génétique à tout moment, de manière à produire des croisements contrôlés avec amplification végétative par voie de boutures de racines (certaines semences de vergers à pollinisation libre seront utilisées également par famille). Ces boutures seront ensuite déployées sur les plantations sous forme de parcelles familiales en utilisant des familles qui répondent aux conditions du site et aux objectifs de la plantation. Les forestiers de l'entreprise commanderont des familles précises en fonction des données connues sur le rendement. Cette stratégie agressive permet d'utiliser deux lignes secondaires par aire de reproduction sans avoir à se préoccuper des problèmes d'autofécondation de la population de production, vu que toutes les souches de coascendance sont conservées dans les mêmes lignes secondaires.

En raison de la variation des types de tenures, de propriétaires et d'installations de production de semis, ainsi que de la diversité des objectifs de gestion de la plantation, le programme BCFS est moins bien placé pour affecter des familles précises à des sites précis comme le fait la Weyerhaeuser Company. Aussi, les objectifs du programme consistent à produire une souche généalogique générale, stable sur le plan de la croissance, de la densité et de la forme. Le recours relativement minime à des souches supérieures ou à densité élevée dans certains secteurs constitue une exception. Les boutures de racines ou d'autres options de clonage ne remplaceront pas les semences de vergers dans un avenir prévisible. Tant qu'on poursuivra l'utilisation des semences, le programme d'amélioration génétique et les structures des lignes secondaires seront conçus pour produire suffisamment de clones sélectionnés non apparentés (environ 30) au niveau de chaque verger, de manière à assurer le maintien de la diversité génétique et le maintien des phénologies de reproduction, avec limitation ou suppression de l'autofécondation. Comme nous l'avons décrit précédemment, lorsque des précisions seront disponibles sur l'autofécondation, les lignes secondaires pourront être fusionnées et certains liens de parenté seront admis au niveau des populations de production. À l'heure actuelle, le BCFS possède un verger de seconde génération établi qui fournira la majorité des semences de Douglas taxifolié destinées aux terres publiques au cours des 15 à 20 prochaines années.

Le recours aux boutures de racines de familles précises et l'affectation méticuleuse des génotypes à des sites précis permettront aux forestiers de Weyerhaeuser d'obtenir des gains plus élevés que la C.-B., en déployant des activités d'amélioration génétique comparables sur le plan de l'intensité et de la durée. Cette stratégie nécessite toutefois une définition précise des objectifs de production de bois et une efficacité de la gestion de manière à garantir l'exactitude et la livraison rapide des résultats

d'études afin de les appliquer aux programmes opérationnels. Sur les terres publiques de C.-B., la diversité des types de tenures et des objectifs de gestion interdit une telle stratégie de déploiement. Le recours aux souches générales est plus simple et plus acceptable dans le contexte d'une gestion intégrée des ressources. Le recours à des familles de forme exceptionnelle ou de densité ligneuse élevée sur certains sites précis constituent des exceptions.

Suivi du rendement à long terme

Au fur et à mesure que progressent les programmes d'amélioration génétique et qu'un volume plus élevé de matériel sélectionné est mis au point dans les plantations opérationnelles, il devient de plus en plus nécessaire d'assurer le suivi des gains réalisés. Il convient entre autres de faire le lien entre les estimations de performance basées sur les évaluations d'arbres uniques (à l'image des tests de descendance) et les résultats relatifs à un secteur précis, particulièrement en ce qui concerne les caractères de rendement. Les gains en terme de productivité doivent également être reliés aux modèles de croissance et de rendement utilisés à des fins de gestion de la forêt.

Des parcelles expérimentales de gains réalisés ont été créées par la Weyerhaeuser, le programme des secteurs côtiers du BCFS et certains coopérants de la NWTIC. D'autres sont prévues pour tous les programmes. En ce qui concerne le programme BCFS, ces parcelles basées sur le secteur serviront à assurer le suivi des résultats à long terme en matière d'amélioration du matériel à des étapes périodes cruciales, ainsi que des gains du programme d'amélioration génétique génération après génération. Cette évaluation nécessitera la comparaison d'une série limitée de représentants du meilleur matériel disponible toutes les deux ou trois générations avec les peuplements naturels. Ces vérifications seront effectuées selon une rotation cyclique complète, de manière à assurer le suivi des progrès réalisés au niveau de la rapidité de la sélection et du

renouvellement des générations de la population d'amélioration génétique.

Conclusion

La sélection et l'amélioration génétique de Douglas taxifolié afin d'obtenir des souches rentables sur un plan économique et supérieures sur le plan génétique fait l'objet d'efforts notables dans l'ouest de l'Amérique du Nord. Si l'échange d'information entre les différents programmes a été satisfaisant, les contraintes et les possibilités sur le plan économique, organisationnel et biologique qui influent sur les méthodes et les progrès réalisés varient selon les programmes. Ces différences sont particulièrement bien illustrées par la comparaison des stratégies de déploiement auxquelles recourent la société Weyerhaeuser et les programmes des secteurs côtiers du BCFS.

Le temps consacré aux travaux de mise au point de la première génération d'amélioration génétique diminuera sensiblement au niveau des générations, au fur et à mesure où les techniques d'amélioration génétique et de sélection précoce seront améliorées. De plus, la connaissance des paramètres génétiques, ce qui inclut la corrélation entre les génotypes et les facteurs environnementaux, permettront une progression plus efficace des programmes dans l'avenir.

Remerciements

Ce document a été basé sur l'information communiquée généreusement par les personnes suivantes : Cheryl Talbert, Weyerhaeuser Company; Jess Daniels et Dan Cress, Daniels and Associates et le North West Tree Improvement Cooperative; Lauren Fins, University of Idaho; George Howe, Sheila Martinson et Mary-Francis Maholovich, U.S. Forest Service; Barry Jaquish, Services forestiers de la C.-B.; Tom Adams, Oregon State University et Pacific Northwest Tree Improvement Research Cooperative; Mike

Bordelon, État de l'Oregon, Department of Forestry.

Références bibliographiques

- Anonyme. 1966. État de l'Oregon - Tree Seed Map. Western Forest Tree Seed Council, USDA Forest Service, Portland, OR.
- Campbell, R.K. 1986. Mapped genetic variation of Douglas-fir to guide seed transfer in southwest Oregon. *Silvae Genet.* 35: 85-96.
- Campbell, R.K. et F.C. Sorensen. 1978. Effects of test environment on expression of clines and on delimitation of seed zones in Douglas-fir. *Theor. and Appl. Genetics* 51: 233-246.
- Carlson, M. 1990. Early testing and selection of lodgepole pine in British Columbia. D'après les délibérations de l'assemblée conjointe West. For. Genet. Assoc. et Groupe de travail IIFR Olympia, WA, USA. Août 1990, 15 p.
- Ching, K.K. et P. Hinz. 1978. Réunion conjointe du comité de travail IUFRO, Vancouver, Canada, 21 août au 9 septembre, 15 p.
- Copes, D.L. 1982. Field tests of graft compatible Douglas-fir seedling rootstocks. *Silvae Genet.* 31: 183-187.
- Harlow, W.M. et E.S. Harrar. 1969. *Textbook of Dendrology*. McGraw-Hill, New York.
- Illingworth, K. 1978. Douglas-fir provenance trials in coastal British Columbia: results to six years after planting. Réunion conjointe du comité de travail IIRF, Vancouver, Canada, 21 août au 9 septembre, 15 p.
- Libby, W.J. et C.C. Cockerham. 1980. Random non-contiguous plots in interlocking field layouts. *Silvae Genet.* 29: 183-190.

- Munger, T.T. et W.G. Morris. 1936. Growth of Douglas-fir trees of known seed source. U.S. Dept. Agric. Tech. Bull. 537, 40 p.
- Orr-Ewing, A.L. 1965. Inbreeding and single crossing in Douglas-fir. *Forest Sci.* 11: 279-290.
- Orr-Ewing, A.L., A.R. Fraser et I. Karlsson. 1972. Interracial crosses with Douglas-fir - early field results. B.C. Forest Service, Research Div. Res. note 55, 33 p.
- Pojar, J., K. Klinka et D.V. Meidinger. 1987. Biogeoclimatic ecosystem classification in British Columbia. *Forest Ecol. and Mgmt.* 22: 119-154.
- Rehfeldt, G.E. 1989. Ecological adaptations in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca*): a synthesis. *Forest Ecol. and Mgmt.* 28: 203-215.
- Schmidt, R.L. 1973. A provenance test of coastal Douglas-fir in British Columbia; preliminary results at six years. D'après les délibérations du groupe de travail IIRF sur les provenances du Douglac taxifolié. Gottingen, West Germany, 14 p.
- Sorensen, F.C. 1983. Geographic variation in seedling Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) from the western Siskiyou Mountains of Oregon. *Ecology* 64: 696-702.
- Stonecypher, R.W. 1990. Assessing effects of seed transfer for selected parents of Douglas-fir: Experimental methods and early results. Réunion conjointe Western Forest Genetics Assoc. et comité de travail IIRF, août 1990, Olympia, Washington. 23 p.
- Wheeler, N.C., R.W. Stonecypher et K.S. Jech. 1990. Physiological characterization of select families to aid in source movement decisions: Supplementing long-term performance trials. Réunion conjointe Western Forest Genetics Assoc. et du groupe de travail IIRF, août 1990, Olympia, Washington. 16 p.

STRATÉGIE D'AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE DE GÉNÉRATIONS AVANCÉES DU PIN GRIS EN ONTARIO

Dennis Joyce

*Institut de recherche forestière de l'Ontario, Ministère des ressources naturelles
1235 Queen St. East, Sault Ste. Marie, Ontario, P6A 5N5*

Peter Nitsche

*Conseil pour l'amélioration des arbres de l'Ontario, 70 Foster Dr., Suite 400
Sault Ste. Marie, Ontario, P6A 6V5*

Résumé

La stratégie d'amélioration génétique de générations avancées proposées est basée sur les objectifs suivants : conservation de complexes génétiques adaptatifs en assurant que les populations et les aires d'amélioration génétique sont viables sur le plan biologique, maintien de la taille effective de la population à un chiffre minimum de 100, de manière à contrôler l'autofécondation et inclusion d'analyses de gains marginaux afin de déterminer l'âge optimal de sélection. Un système d'amélioration génétique de base et un modèle d'accouplement simple serviront à promouvoir des gains génétiques rapides permanents tout en minimisant les ressources humaines et financières nécessaires. Des procédures de tests de sylviculture rurale serviront à évaluer le potentiel génétique et des tests de rendement sur le terrain de portée limitée seront utilisés pour estimer les gains réalisés. Une population d'amélioration génétique pilote servira à mettre au point les détails de la mise en oeuvre.

Introduction

Au cours des 3 dernières années, les activités d'amélioration des arbres en Ontario ont été revitalisées par la création d'une association de coopératives opérationnelles. En dépit des efforts réels du gouvernement et de l'industrie pour réaliser l'amélioration génétique des arbres, les restrictions financières et les limites de ressources humaines devraient se poursuivre dans un avenir prévisible. Les décisions budgétaires devront dépasser le cadre des simples analyses avantages-coûts pour inclure l'évaluation des coûts d'opportunité; en effet chaque dollar consacré à l'amélioration des arbres ne peut être affecté à d'autres programmes. Compte tenu des coûts marginaux, l'âge optimal de sélection se situe vraisemblablement à un âge plus précoce que l'âge auquel le gain par unité de temps est optimal.

Compte tenu de ces réalités, ce document décrit les stratégies générales envisagées pour

l'amélioration génétique de générations avancées du pin gris de l'Ontario (*Pinus banksiana* Lamb.). Si le calendrier, les objectifs et les caractères choisis seront susceptibles de varier selon les programmes, la stratégie proposée est considérée comme le modèle de base de toutes les populations d'amélioration génétique du pin gris. Ce document débute par une étude des principes économiques et biologiques de base ainsi que de leur application aux programmes d'amélioration génétique. Nous exposerons ensuite les progrès récents sur le plan théorique et technologique réalisés au niveau des différentes composantes du cycle d'amélioration génétique, éléments sur lesquels repose la justification des stratégies d'amélioration génétique de générations avancées de pin gris.

Adaptation

Lorsque la sélection des aires et des populations d'amélioration génétique sera rigoureuse en ce qui concerne les complexes de gènes adaptatifs,

l'importance de la corrélation entre les génotypes et les facteurs environnementaux diminuera sensiblement et des améliorations notables de l'efficacité des tests génétiques pourront être réalisées (Rehfeldt, 1984). Toutefois, même si les aires et les populations d'amélioration génétique sont viables sur le plan biologique, les décisions de sélection doivent tenir compte de la corrélation entre les rythmes de croissance obtenus, de manière à garantir que les complexes de gènes adaptatifs ne se détériorent pas au niveau des générations avancées (Rehfeldt, 1992). Des études de génécologie du pin gris, conçues pour mettre en évidence les modèles de variation d'adaptabilité sont actuellement en cours en Ontario. Les procédures de test du programme de génécologie de l'Ontario sont inspirées des principes de Rehfeldt (1986). Les données relatives à la variation de l'adaptabilité qui en découleront serviront à garantir que la population et la base de terrain qu'elle dessert sont viables sur le plan biologique. Cette information servira de base à l'élaboration d'un programme efficace de générations avancées.

Taille de population efficace

Un des principaux objectifs des stratégies d'amélioration génétique de générations multiples consiste à assurer la conservation d'une réserve génétique élargie de manière à contrôler les effets de l'autofécondation. La théorie de la génétique des populations appliquée à la biologie de conservation fournit des indications précieuses aux responsables des programmes d'amélioration génétique qui tentent de déterminer la taille idéale de la population de reproduction. Frankel et Soule' (1981) invoquaient la règle de 1 p. 100 comme «règle de base de la génétique de conservation». Cette règle stipule que la sélection selon des critères de rendement et de fertilité peut compenser les effets de la dépression de consanguinité lorsque l'augmentation du coefficient d'autofertilisation est inférieure à 1 p. 100 par génération. Il existe une corrélation simple entre

la taille de la population et la modification du coefficient d'autofertilisation (delta F).

$$\Delta F = 1/(2N_e)$$

Où N_e représente la taille de la population efficace, c.-à-d. la taille de la population idéale sujette au même degré de dérive génétique que la population réelle étudiée. Le qualificatif «idéal» fait référence à une population caractérisée par un accouplement aléatoire, parfaitement équilibrée sur le plan des sexes et dont le nombre de descendance par famille suit une distribution aléatoire. Les déviations par rapport à cette population idéale font baisser la taille de la population efficace en dessous du chiffre de la population réelle.

Aussi, les effectifs minimums d'une population efficace doivent être d'environ 50 pour que le contrôle de l'autofertilisation soit possible. Lorsqu'on applique un critère légèrement plus conservateur pour fixer le coefficient d'autofertilisation (p. ex., $\Delta F = 0,5\%$) l'effectif minimum de la population efficace passe à 100 individus. Une seconde étude a permis de préciser que l'objectif de conservation consistait à conserver 90 p. 100 de la variation génétique originale au bout de 200 ans, ainsi que d'évaluer l'incidence de la longueur des générations (Hedrick et Miller, 1992). Ils ont constaté que lorsque l'intervalle entre générations était fixé à 10 ans, la taille efficace de la population devait se situer entre 50 et 100.

Les tests génétiques effectués sur les générations avancées seront axés sur la sélection infra-familiale étant donné que les sélections familiales réduisent la taille efficace de la population. En conséquence, à partir de la seconde génération, des tests génétiques seront réalisés sur un nombre de familles inférieur et sur un nombre plus élevé d'individus par famille. Sur la base de ces données, une population efficace de 100 individus sera la norme initiale utilisée pour les programmes de générations avancées.

Économie

Au cours des 15 dernières années, de nombreux travaux ont été consacrés à la mise en évidence de l'âge optimal de sélection avant le lancement du cycle d'amélioration génétique suivant. Si des progrès notables ont été réalisés dans ce domaine, les travaux ont consisté essentiellement à effectuer la comparaison biologique des gains réalisés par génération et des gains réalisés par unité de durée. Toutefois, une étude récente (White et Hodge, 1992) a évalué l'âge optimal de sélection sous un nouvel angle. Les notions de gains marginaux et de dévaluation économique ont été inclus dans les calculs de l'âge optimal de sélection du pin d'Elliott (*Pinus elliotii*). Les auteurs ont découvert que le taux d'actualisation avait une incidence importante sur l'efficacité de la sélection (gain par année) et sur l'âge optimal de sélection (figure 1). Selon un taux d'actualisation nul (c.-à-d. aucune pondération économique de la durée), l'efficacité de la sélection augmente avec l'âge jusqu'à 10 ans. Si l'efficacité relative est inférieure à celle qui correspond à la sélection directe (volume à 15 ans), l'âge optimal de sélection a été estimé à 9 ans, étant donné la possibilité d'effectuer une rotation plus rapide des générations. Au fur et à mesure où augmente le taux d'actualisation, la sélection précoce devient plus efficace que la sélection directe et l'âge optimal de sélection diminue. Selon un taux d'actualisation limité à 3 p. 100, la sélection précoce devient plus efficace que la sélection directe à partir de l'âge de 15 ans. Cela revient à dire que même en cas de génération unique, les gains de la sélection directe sont inférieurs à ceux de la sélection précoce. Les auteurs en concluent que la poursuite des tests au-delà de l'âge de 10 ans a un intérêt limité sur le plan opérationnel, vu que la mesure des résultats devient de plus en plus coûteuse, alors que les gains génétiques supplémentaires pour le programme opérationnel sont limités.

Les gains marginaux deviendront de plus en plus un facteur important au niveau des décisions rel-

atives à la détermination de l'âge optimal de sélection de tous les programmes d'amélioration génétique des générations avancées en Ontario.

Programme du pin gris en Ontario

Le pin gris possède plusieurs qualités qui en font le choix idéal des activités de recherche appliquée dans le domaine de l'amélioration des arbres et de la génétique forestière (Rudolph *et al.*, 1989). Le pin gris est réputé pour sa croissance juvénile rapide et son rendement en sylviculture (Yeatman, 1984). Il est répandu dans tous les peuplements équiens de l'Ontario où il se classe au second rang seulement après l'épinette noire pour la superficie du programme de plantation. La floraison peut se produire à des âges très précoces et une floraison importante peut se produire dès la 7^e année. La forte diversité phénotypique du pin gris en fait un candidat prometteur dans le domaine de l'amélioration génétique autant pour les caractères de croissance que de taille (Magnussen et Yeatman, 1987; Pol, 1972; Rudolph et Yeatman, 1982).

L'objectif des responsables de programmes d'amélioration génétique consiste à convertir les fréquences allèles en traits importants sur le plan économique, tout en conservant la variation allélique des caractères d'adaptabilité. Afin de faciliter la présentation, toutefois, nous allons utiliser la croissance verticale pour illustrer cette stratégie. Dans les faits, les réponses corrélées relatives aux autres traits seront prises en compte lors de l'estimation des valeurs d'hybridation. Sans que cela ne soit encore officiel, l'objectif de l'amélioration génétique du pin gris consiste vraisemblablement à améliorer le taux de croissance et la forme, tout en assurant le maintien de la qualité du bois et de la phénologie.

Depuis le début des années 1980, 27 vergers producteurs de graines de pin gris ont été établis en Ontario. Chaque verger renferme des semis provenant de plus de 400 essences (ministère des Ressources naturelles de l'Ontario, 1987). À

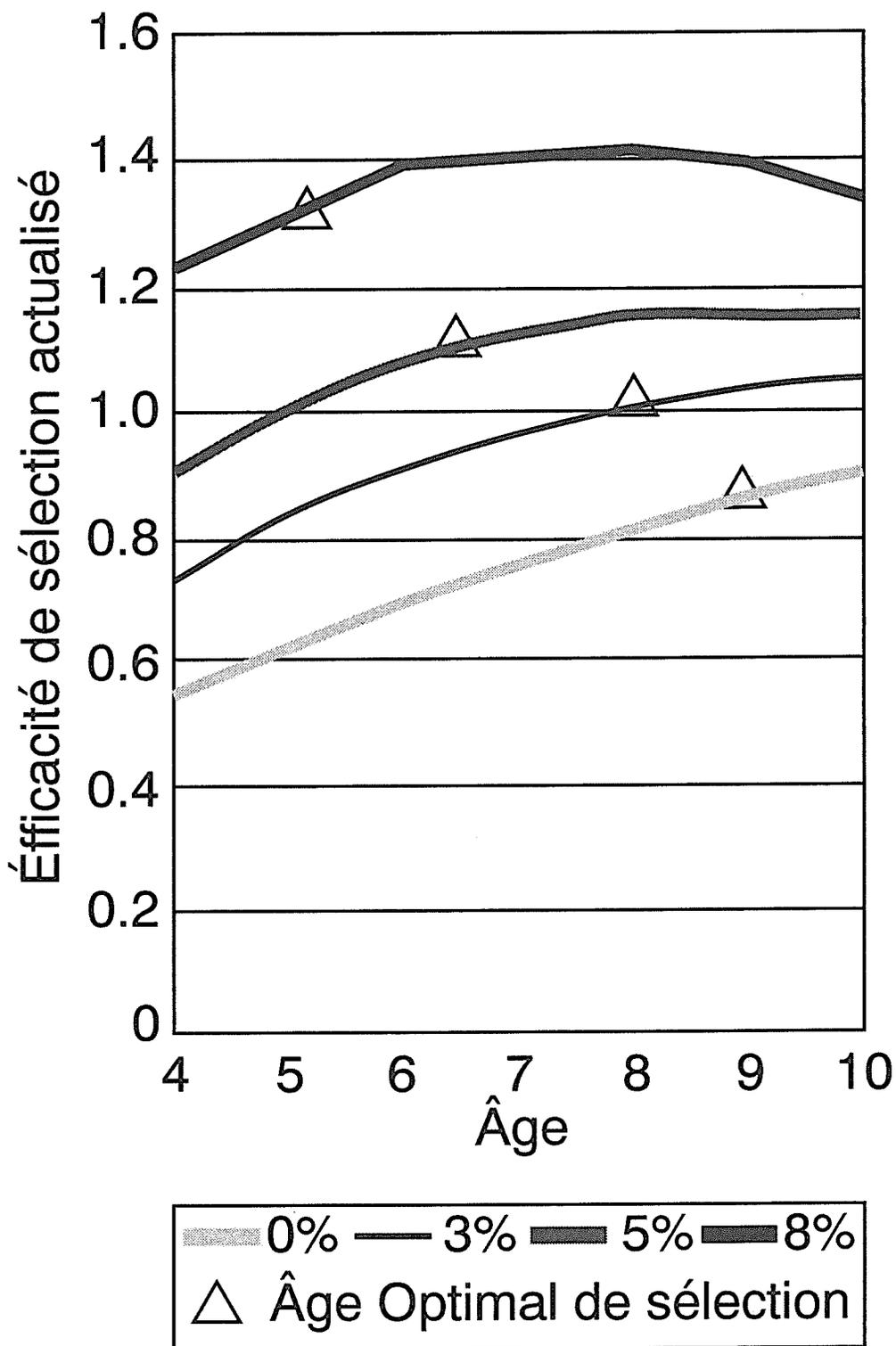


Figure 1 Efficacité de sélection actualisée (0, 3, 5 et 8 %) de l'amélioration du volume du pin Elliott au bout de 15 ans. L'efficacité est calculée sur la base de 12 sites d'expérimentation en supposant une précision élevée (c.-à-d. héritabilités élevées) (d'après White et Hodge, 1992).

Tableau 1. Estimations de l'héritabilité relative à la hauteur totale des arbres tirée des tests de rendement sur le terrain portant sur les quatre programmes opérationnels d'amélioration génétique du pin gris (environ 400 familles par programme).

Age	Programme				Moyenne
	1	2	3	4	
Héritabilité des arbres individuels					
3	0,19	0,13	-	-	0,160
5	0,12	0,11	0,17	-	0,133
6	-	-	-	0,14	0,14
7	0,14	0,13	-	-	0,136
Héritabilité de la famille					
3	0,42	0,29	-	-	0,345
5	0,32	0,25	0,52	-	0,363
6	-	-	-	0,32	0,32
7	0,35	0,28	-	-	0,315

l'issue de l'épuration finale (après la 20^e année), chaque verger retiendra dans le meilleur des cas, le quart supérieur des arbres en terme de qualité. Plusieurs vergers ont déjà été partiellement épurés afin d'éliminer les familles de qualité inférieure.

Ces épurations ont été basées sur la taille (entre la 5^e et la 7^e années) selon les données tirées des tests génétiques 2 et 3. L'héritabilité des familles déduite des tests de rendement sur le terrain atteignait en moyenne 0,35 et se situait entre 0,25 et 0,52 (tableau 1). Ces chiffres relativement faibles sont au moins en partie imputables au degré élevé de dégâts, particulièrement les dégâts dus à l'orchestre du pin blanc. Les tests révélaient en moyenne que moins de 30 p. 100 des arbres étaient intacts.

Proposition de stratégie d'amélioration génétique de générations avancées pour le pin gris

Sélection

La sélection des individus en vue de former la population d'amélioration génétique de la

génération suivante sera basée sur le classement des individus en fonction de leur valeur reproductive ou de leur valeur génétique. L'efficacité de cette sélection dépend fortement des modèles, de la méthodologie et des techniques utilisées pour calculer les valeurs reproductives. Théorie et pratique révèlent que la sélection par indexage est la méthode la plus efficace de sélection (Cotterill et Jackson, 1985). White et Hodge (1989) ont décrit une méthodologie d'indexation, soit la Méthode de comparaison directe; la méthode optimise la corrélation entre les valeurs d'amélioration génétique prévues et les valeurs réelles dans le cas des programmes d'amélioration des arbres dont les données sont fréquemment contradictoires et peu fiables.

Les décisions relatives à l'épuration des vergers producteurs de graines en Ontario sont à l'heure actuelle basées sur les procédures de la Méthode de comparaison directe. Ces mêmes procédures seront étendues à l'établissement de la population génétique de seconde génération de manière à optimiser l'efficacité de la sélection. Les populations d'amélioration génétique de seconde génération incluront à la fois des sélections en

amont et en aval lorsque les estimations des valeurs reproductives le justifient.

Modèles d'accouplement

Il existe un certain nombre de modèles d'accouplement de complexité diverse pour l'amélioration génétique de générations avancées. Toutefois, le modèle d'accouplement a infiniment moins d'incidence sur l'efficacité du gain que la méthodologie de sélection ou la durée du processus d'amélioration génétique. À titre d'exemple, Cotterill (1986a) a comparé l'accouplement par demi-diallèles à l'accouplement par paires uniques et il a constaté que si l'accouplement plus élaboré par diallèles affichait le maximum de gain par génération, le modèle d'accouplement par paire unique offrait les gains les plus élevés par unité de durée, étant donné que les croisements contrôlés pouvaient être réalisés en moins de temps. La réduction de l'intervalle entre générations d'une durée de seulement un an avait une incidence marquée sur les gains par unité de durée (Cotterill, 1986b). L'auteur faisait remarquer que les plans ambitieux peuvent annuler les efforts d'amélioration des arbres lorsque leur exécution manque de rigueur et qu'il est nettement préférable sur le plan de l'efficacité d'utiliser une stratégie simple au lieu de se perdre dans un modèle complexe. Toutes choses demeurant égales, compte tenu de la loi de Murphy, il est préférable de s'en tenir à un schéma d'hybridation simple.

Compte tenu des ressources limitées disponibles pour les travaux de pollinisation contrôlée, de la relative inefficacité des modèles d'hybridation simple, du manque d'information disponible sur les valeurs reproductives des souches parentales et de l'accent accordé à la sélection infra-familiale, les pollinisations contrôlées seront limitées (entre 50 et 100) et ne seront pas inspirées d'un modèle rigide. On utilisera plutôt un indice «d'hybridation idéal» afin de prévoir les croisements les plus prometteurs (Cotterill, 1989).

Système d'amélioration génétique

Si les lignes secondaires constituent la stratégie traditionnelle d'amélioration génétique de générations avancées, la rentabilité financière de cette stratégie est affaiblie par l'éparpillement de ressources limitées afin d'assurer le croisement contrôlé à grande échelle de tous les individus d'une population de reproduction relativement importante. À titre d'exemple, dans le cas d'un système de lignes secondaires prévoyant 400 sélections (la norme pour les programmes de l'Ontario), un minimum de 200 croisements contrôlés devront être réalisés selon un modèle de croisement par paire unique. Lorsqu'on multiplie ce chiffre par 27, soit le nombre de populations d'amélioration génétique du pin gris en Ontario, le nombre minimum des hybridations nécessaires à chaque génération selon une stratégie de lignes secondaires est de 5 400. Il est fortement improbable que le personnel limité de la province puisse gérer la logistique d'un programme d'hybridation contrôlée d'une telle envergure, particulièrement lorsqu'on ajoute les programmes d'amélioration des arbres d'autres essences.

Un système original d'amélioration génétique a récemment été mis au point au profit des coopératives d'amélioration génétique du mouton en Australie. Appelé «système d'amélioration du troupeau souche» il consiste à concentrer les investissements sur le matériel possédant les meilleures qualités génétiques (Jackson et Turner, 1972; James, 1977, 1978; Rae, 1977). Adapté à l'eucalyptus et au pin de Monterey, le système permet de réduire sensiblement le nombre de croisements contrôlés tout en conservant intactes les possibilités de gains génétiques rapides (Cotterill *et al.*, 1988).

Le système d'amélioration génétique du troupeau souche ou noyau remodèle la structure de la population d'amélioration génétique traditionnelle pour la scinder en une population à deux niveaux; une population «principale» nombreuse et une population «noyau» formée d'une élite moins

nombreuse. Dans le cas du pin de Monterey, la population principale est régénérée par sélection à partir des tests de descendance en pollinisation libre et la sélection du noyau est effectuée à partir des tests en pollinisation contrôlée. (Cotterill *et al.*, 1988). A chaque génération, une partie du noyau est dérivée des meilleurs représentants de la population principale et une autre partie de ce noyau est réintégrée à la population principale afin de promouvoir l'amélioration rapide de celle-ci. La méthode permet donc des gains génétiques rapides à chaque génération, en concentrant les ressources financières et les activités d'amélioration génétique sur un nombre relativement faible d'individus affichant les meilleurs valeurs reproductives.

Dans le cas du pin de Monterey, la population principale contient 300 parents femelles obtenus par sélection à partir de croisements en pollinisation libre et de sélection massale et une population noyau composée de 40 parents «d'élite» est régénérée à chaque génération grâce à un modèle d'hybridation circulaire (Cotterill *et al.*, 1988). Si les chiffres exacts du pin gris n'ont pas encore été déterminés, on vise à obtenir une population noyau qui ne dépasse pas 100 arbres. Une telle formule combinée à un modèle d'hybridation simple permettrait de limiter le nombre d'hybridations contrôlées par génération à un chiffre minimum (p. ex., hybridation à paires uniques, 50 croisements). La population principale ne devrait pas dépasser 300 sélections et elle sera basée sur des tests en pollinisation libre et sur une sélection massale.

Tests

Les tests génétiques constituent une composante coûteuse mais essentielle du cycle d'amélioration génétique. Si la constitution de populations viables sur le plan biologique constitue l'une des conditions essentielles de l'efficacité des gains génétiques réalisés, la planification méthodique des programmes de tests constitue la pierre angulaire d'un tel programme. L'évaluation

soigneuse de la durée, du type et du nombre de tests génétiques à déployer est l'une des conditions indispensables à l'optimisation des gains génétiques par unité de temps et par dollar dépensé. Les décisions relatives à l'investissement financier correspondant aux tests génétiques doivent être fondées sur l'âge auquel on souhaite obtenir de l'information ainsi que sur la précision prévue des tests correspondant à ces âges.

Durée : Si l'objectif ultime d'un programme d'amélioration des arbres consiste à améliorer la quantité ou la qualité du rendement d'un cycle économique, le coût de la gestion et de l'évaluation des résultats de tests génétiques convenablement conçus, de manière à générer des estimations de haute qualité des paramètres jusqu'à des âges pouvant atteindre 40 ans rendent de tels tests irréalistes. Quoiqu'il en soit, les spécialistes des mesures ont montré qu'en l'absence d'événements graves sur le plan environnemental, la croissance des arbres entre les âges de 10 à 15 ans suit une courbe précise (Rehfeldt, 1984). En conséquence, l'évaluation de l'âge de sélection optimal pour le pin gris sera basée sur les corrélations âge par âge avec les arbres de 20 ans, et non sur des données imprécises sur l'âge de la coupe (avec les estimations de paramètres douteuses). Étant donné l'incidence des intervalles entre générations, l'abaissement de l'âge de référence à 20 ans justifie la nécessité de réaliser des corrélations âge pour âge plus rigoureuses afin d'assurer le maintien de l'âge de sélection optimal à un chiffre constant (Lambeth, 1983).

Type de test : Traditionnellement, les programmes d'amélioration des arbres ont été basés sur les tests de «rendement sur le terrain» réalisés sur des sites représentatifs du milieu de déploiement visé et administrés à grande échelle, ainsi que sur les données relatives au rendement (c.-à-d. potentiel génétique modifié par des facteurs environnementaux aléatoires fortuits) réunies à des intervalles annuels multiples. Les

limites de ce type de test découlent du manque de précision des données relatives aux premières années lors de l'implantation des arbres et du manque d'uniformité de cette précision par la suite. Les principaux arguments invoqués pour justifier la réalisation systématique de tests de rendement sur le terrain sont entre autres les suivants : 1) nécessité de réaliser des tests multiples représentatifs de la diversité des milieux visés et d'évaluer la corrélation entre les génotypes et les interactions de l'environnement, et 2) nécessité de disposer de données sur le rendement à des âges avancés, afin de permettre une sélection efficace. Toutefois, la constitution rigoureuse de populations d'amélioration génétique viables sur le plan biologique limite fortement la corrélation entre les génotypes et les interactions environnementales (Rehfeldt, 1984). De plus, vu qu'il est admis que l'âge optimal de sélection est généralement inférieur à 10 ans (Lambeth, 1980), l'avantage des tests de rendement sur le terrain (avec l'importance qu'ils accordent aux résultats à long terme) par rapport aux autres types de tests doit être soigneusement évalué.

Au cours des 15 dernières années, on a accordé une importance notable aux tests à court terme et à l'identification de l'âge optimal de sélection (p. ex., Burdon, 1989; Carter *et al.*, 1990; Lambeth, 1980, 1983; Magnussen et Yeatman, 1987; Reimenschneider, 1988). Les corrélations âge pour âge se sont avérées prévisibles quelle que soit l'essence, et l'âge optimal de sélection est inférieur à 10 ans, pour des périodes de rotation pouvant atteindre jusqu'à 50 ans (Lambeth, 1980). Les travaux réalisés sur les tests à court terme ont permis une amélioration de la précision des méthodes de test dont disposent les spécialistes de l'amélioration génétique, et ce à un âge plus précoce. Ces procédures de tests modifiés sont généralement baptisées «tests de sylviculture rurale».

Le principal objectif des tests de sylviculture rurale consiste à produire de l'information de grande

qualité sur le potentiel génétique entre les âges de 3 et 10 ans. Les tests de sylviculture rurale sont basés sur la sélection d'un site caractérisé par une croissance vigoureuse, sur la pratique de culture saine et le recours à un modèle dont les principales caractéristiques sont un espacement initial réduit et la possibilité de réaliser des éclaircies au fur et à mesure où les arbres augmentent de volume. De plus, on se donne pour objectif explicite de minimiser les facteurs environnementaux aléatoires ainsi que de purger les statistiques des arbres endommagés avant les analyses. Les corrélations âge pour âge entre d'une part la taille des arbres individuels, des familles et des provenances pour le Douglas taxifolié, le pin blanc de l'Ouest, le pin rouge et le pin de Monterey lors des premières années de croissance de ces tests de sylviculture rurale, et d'autre part les hauteurs recensées dans le cadre de tests plus anciens de rendement sur le terrain ont généralement été élevées; $r=0,8$ (Rehfeldt, 1984).

À titre d'exemple, Carlson (1990) rendait compte des résultats sur 6 ans des tests de sylviculture rurale ainsi que de leurs tests complémentaires sur le terrain (tableau 2). Il concluait que les tests de sylviculture rurale offraient une plus grande précision de l'estimation des moyennes des familles et produisaient des hérabilités familiales plus élevées que les tests complémentaires traditionnels sur le terrain.

Les résultats des tests de sylviculture rurale ont été également plus uniformes peu importe le test ou la population. Le test de sylviculture rurale le plus ancien réalisé en Ontario a réalisé 3 saisons de croissance complète; il inclut un assortiment complet de sélections d'arbres de choix d'épinette noire (400). Les hérabilités relatives à la hauteur totale ont jusqu'ici été passablement fortes (tableau 3). L'estimation des gains ($i-1,0$) relatifs à la hauteur de 3 ans enregistrés dans le cadre des tests de sylviculture rurale est de 4,1 p. 100. La moyenne des hérabilités relatives aux hauteurs correspondant à la troisième, à la cinquième, à la

Tableau 2. Héritabilité des familles pour les hauteurs des arbres de 2 et 6 ans, dans le cadre de 4 tests de sylviculture rurale (deux programmes distincts) et les hauteurs de 6 ans, dans le cadre de 5 tests complémentaires de rendement sur le terrain (60 familles). D'après Carlson (1990).

Test sylviculture rurale	Âge					Test de rendement sur le terrain
	2	3	4	5	6	
Programme 1						
Skimikin	0,91	0,88	0,91	0,91	0,93	0,71
Grandview	0,92	0,79	0,79	0,80	0,80	0,36
Programme 2						
Willow Cr.	0,88	0,81	0,71	0,73	0,73	0,64
Red Rock	0,86	0,77	0,32	0,38	0,49	0,59
						0,41

sixième et à la septième années tirée des tests de rendement sur le terrain était nettement plus faible (tableau 1). En conséquence, l'estimation de la moyenne des gains réalisés au niveau de la hauteur au bout de 3 ans selon les tests de rendement sur le terrain ($1=1,0$) est de 2,5 p. 100. Si les corrélations âge pour âge n'ont pas été utilisées pour les calculs, ces chiffres illustrent le degré d'amélioration de la précision que permettent les tests de sylviculture rurale.

Nombre de tests : Le dernier point à régler lorsqu'on envisage les stratégies de tests correspond au nombre optimal de parcelles expérimentales à réaliser. En 1991, Carson rendait compte d'une étude de la corrélation entre le nombre de tests et l'efficacité de la sélection, en

se basant sur les données de tests génétiques du pin de Monterey réalisés sur 11 sites en Nouvelle-Zélande. L'auteur constatait qu'en moyenne, les résultats de chaque site d'expérimentation permettaient d'obtenir environ 66 p. 100 du gain maximal estimé découlant de l'ensemble des 11 sites. La moyenne d'efficacité relative des gains estimés grimpa à environ 82, 89 et 93 p. 100 pour 2, 3 et 4 sites d'expérimentation respectivement. Du point de vue des gains strictement marginaux, le recours à une stratégie basée sur plus de deux sites ne semble pas justifiée.

Une autre étude récente de l'efficacité de sélection du pin Elliott illustre l'importance de la qualité des tests, par opposition à la quantité (White et Hodge, 1992). Les auteurs ont modifié l'estimation des

Tableau 3 Estimations de l'héritabilité des hauteurs à 1, 2 et 3 ans tirées d'un test opérationnel de sylviculture rurale de l'épinette noire en Ontario (400 familles en pollinisation libre).

Âge	Héritabilité	
	Arbres individuels	Famille
1	0,48	0,68
2	0,60	0,79
3	0,45	0,76

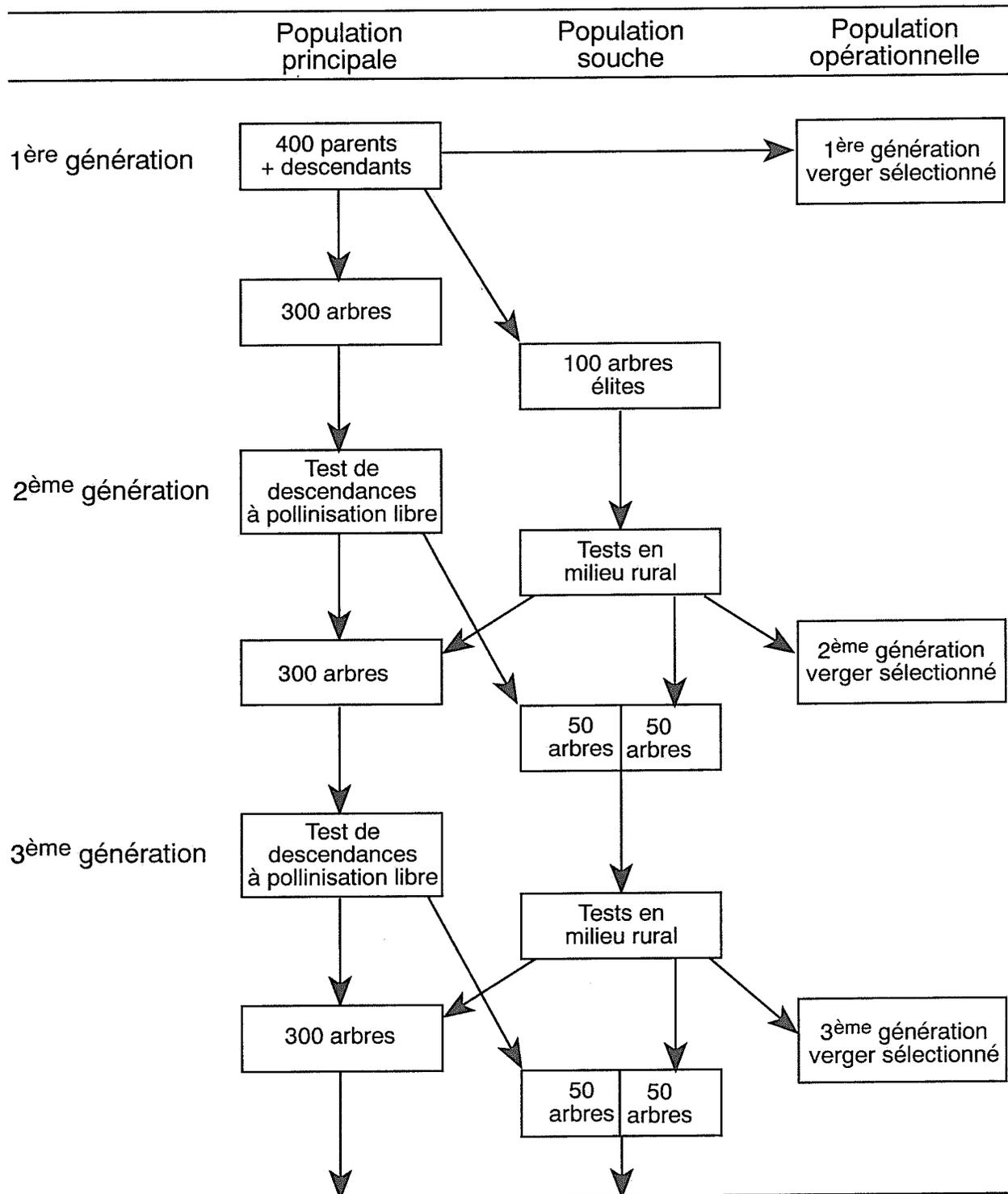


Figure 2. Stratégie d'amélioration génétique de la population souche du pin gris en Ontario

paramètres afin d'illustrer l'augmentation de précision qui va de pair avec l'amélioration des techniques de mise à l'essai; puis ils ont comparé les résultats avec les estimations originales des paramètres de la première génération. En vertu d'un tel scénario de «tests améliorés», le nombre de sites expérimentaux nécessaires pour obtenir une efficacité de sélection donnée a été réduit d'environ 50 p. 100. De plus, la sélection infra-familiale à laquelle on accordera une importance accrue au niveau des générations avancées préconise l'augmentation de la taille des échantillons (c.-à-d. l'augmentation du nombre d'arbres par famille) au détriment de l'augmentation du nombre des tests.

Les tests des générations avancées sont composés d'un minimum de deux tests de sylviculture rurale qui servent à évaluer le potentiel génétique ainsi que d'une série de parcelles de vérification des gains soigneusement agencées (c.-à-d. plantation de rectangles au sein des parcelles de vérification sur le terrain) de manière à convertir les gains estimés en chiffres de croissance et de rendement. Les avantages de la conversion de l'un ou des deux types de tests de sylviculture rurale en vergers producteurs de graines seront évalués lors de l'élaboration des plans de transfert des gains au niveau des plantations de production.

Étapes suivantes

Le programme de gestion des ressources génétiques de l'Institut de recherche forestière de l'Ontario collaborera avec le personnel des programmes opérationnels afin de préciser la population opérationnelle d'amélioration génétique qui sera utilisée pour la mise en oeuvre «pilote» de la stratégie de générations avancées. Les connaissances acquises dans le cadre de ce programme pilote serviront de référence pour la mise en oeuvre à grande échelle. En règle générale, les plans de mise en oeuvre incluent les éléments suivants (voir figure 2) :

- 1) Le recours à de l'information génétique afin d'évaluer et si nécessaire de modifier la population opérationnelle d'amélioration génétique choisie de manière à assurer la viabilité biologique.
- 2) Méthode de comparaison directe afin de classer les parents et leur descendance en fonction de leur valeur reproductive combinée, et de réaliser la sélection de 100 souches élites pour constituer la population d'amélioration génétique souche.
- 3) Réaliser 300 sélections supplémentaires afin de constituer la population d'amélioration génétique principale. Effectuer la récolte des semences en pollinisation libre pour les tests.
- 4) Élaborer un indice d'«hybridation idéal», préciser le nombre optimal de croisements contrôlés qu'il sera possible d'appuyer et mettre en oeuvre le concept d'hybridation relatif à la population souche.
- 5) Constituer un minimum de deux tests en milieu rural afin d'évaluer le potentiel génétique. L'évaluation du troisième test en milieu rural sera basée en partie sur les analyses de gains marginaux. Les parcelles de tests seront épurées au bout de 5 ans et les parcelles de vérification des gains réalisés (tests de rendement sur le terrain) seront constituées sur la base des données relatives à la cinquième année. La mesure finale des tests en milieu rural se fera au plus tard la dixième année, selon les résultats des analyses de gains marginaux relatives à l'âge de sélection optimal.
- 6) Sélectionner les 50 meilleurs représentants des tests de sylviculture rurale ainsi qu'un groupe de 50 individus complémentaires provenant du test de descendance de la population principale afin de composer la population souche suivante.

- 7) Convertir les tests de sylviculture rurale en vergers producteurs de graines.

Nombre de questions et de problèmes seront soulevés il ne fait aucun doute, au fur et à mesure de la mise en oeuvre de la stratégie proposée. Le personnel de gestion des ressources génétiques de l'Institut de recherches forestières de l'Ontario prendra l'initiative de répondre aux questions soulevées. Les besoins d'information sont essentiellement les mêmes que ceux que soulèvent les autres stratégies d'amélioration génétique. Ils sont susceptibles d'inclure les besoins suivants :

- 1) Corrélations âge pour âge basées sur les données de haute qualité relatives à tous les âges pour les tests de sylviculture rurale.
- 2) Analyses économiques des gains marginaux associés au report de la sélection.
- 3) Élaboration d'un protocole de test efficace relatif à la «population principale».
- 4) Évaluation des avantages et des risques (gains génétiques par opposition à taille de population efficace) reliés aux sélections multiples effectuées à partir des familles souches idéales.
- 5) Détermination du calendrier et du niveau idéal d'épuration pour la sélection en plusieurs étapes.
- 6) Suivi des réponses corrélées entre les différents caractères.
- 7) Conception de méthodes efficaces de vérification des gains réalisés.
- 8) Détermination du modèle optimal de la population de production (c.-à-d. calendrier et méthode d'établissement des vergers, particulièrement lorsque les tests de sylviculture rurale ne sont pas convertis en vergers).

Sommaire

À l'évidence, de nombreux autres travaux seront nécessaires pour convertir les stratégies d'amélioration génétique de générations avancées décrites en un programme opérationnel. Toutefois, les caractéristiques de base de la stratégie proposée incluent les éléments suivants :

- 1) Zones et populations d'amélioration génétique viables sur le plan biologique.
- 2) Décisions de sélection basées sur les valeurs reproductives prévues grâce à la méthode de comparaison directe.
- 3) Concentration des ressources limitées sur le meilleur matériel génétique selon la stratégie d'amélioration génétique du noyau.
- 4) Combinaison de tests de sylviculture rurale destinées à évaluer le potentiel génétique et d'une stratégie axée sur la sélection infra-familiale, et tests de rendement sur le terrain de portée limitée afin d'estimer les gains réalisés.
- 5) Calcul de l'âge de sélection optimal sur la base d'analyses économiques des gains marginaux.

Références bibliographiques

- Burdon, R.D. 1989. Early selection in tree breeding: principles for applying index selection and inferring input parameters. *Can. J. For. Res.* 19: 499-504.
- Carlson, M. 1990. Early testing and selection of lodgepole pine in British Columbia. IIRF Meeting on Douglas-fir, Contorta Pine, Sitka spruce, and Abies Breeding and Genetic Resources. 20-25 août 1990, Olympia, Washington, p. 4.22-36.

- Carson, S. 1991. Genotype X environment interaction and the optimal number of progeny test sites for improving *Pinus radiata* in New Zealand, N.Z. Jour. For. Sci. 21: 32-49.
- Carter, K.K., G.W. Adams, M.S. Greenwood et P. Nitschke. 1990. Early family selection in jack pine. Can. J. For. Res. 20: 285-291.
- Cotterill, P.P. 1986a. Breeding strategy: Don't underestimate simplicity. Position Paper, Proc. IUFRO Meeting on Breeding Theory, Progeny Testing, and Seed Orchards. 12-17 oct., 1986, Williamsburg, Virginia, p. 8-23.
- Cotterill, P.P. 1986b. Genetic gains expected from alternative breeding strategies including simple low cost options. Silvae Genet. 35: 212-223.
- Cotterill, P.P. 1989. The nucleus breeding system. Dans Proc. Twentieth South. For. Tree Improv. Conf. 26-30 juin, Charleston, S.C. p. 36-42.
- Cotterill, P., C. Dean, J. Cameron et J. Brindbergs. 1988. Nucleus breeding: A new strategy for rapid improvement under clonal forestry. IIFR - Meeting on Breeding Tropical Tree. 28 nov. - 2 déc. 1988. Pattaya, Thaïlande, 15 p.
- Cotterill, P.P. et N. Jackson. 1985. On index selection I. Methods of determining economic weight. Silvae Genet. 34: 6-63.
- Frankel, O.H. et M.E. Soule'. 1981. Population genetics and conservation. Dans Conservation and evolution. Cambridge University Press, N.Y., p. 31-77.
- Hedrick, P.W. et P.S. Miller. 1992. Conservation genetics: Techniques and fundamentals. Ecol. Appl. 2: 30-46.
- Jackson, N. et H.N. Turner. 1972. Optimal structure for a co-operative nucleus breeding system. Proc. Aust. Soc. Anim. Prod. 9: 55-64.
- James, J.W. 1977. Open nucleus breeding systems. Anim. Prod. 24: 287-305.
- James, J.W. 1978. Effective population size in open nucleus breeding schemes. Acta Agric. Scand. 28: 387-392.
- Lambeth, C.C. 1980. Juvenile-mature correlations in Pinacea and implications for early selection. For. Sci. 26: 571-580.
- Lambeth, C.C. 1983. Early testing - an overview with emphasis on loblolly pine. Proc. 17th Southern For. Tree Improv. Conf. 15 p.
- Magnussen, S. et C.W. Yeatman. 1987. Early testing of jack pine. II. Variance and repeatability of stem and branch characters. Can. J. For. Res. 17: 460-465.
- Ontario Ministry of Natural Resources. 1987. Ontario Tree Improvement Master Plan. Queen's Printer for Ontario, MGS Publications Services Section, 880 Bay Street, Toronto, 81 p.
- Polk, R.B. 1972. Heritability of some first-order branching traits in *Pinus banksiana* Lamb. Proc. 8th Central States For. Tree Improv. Conf. p. 33-39.
- Rae, A.L. 1977. Group breeding schemes in sheep improvement in New Zealand Proc. New Zealand Soc. Anim. Prod. 37: 206-21.
- Rehfeldt, G.E. 1984. Veracity of short-term testing. Dans Progeny Testing. USDA For. Serv., Proc. Servicewide Genetics Workshop, 5-9 décembre 1983, Charleston S.C., 20 p.
- Rehfeldt, G.E. 1986. Adaptive variation in *Pinus ponderosa* from intermountain regions. I.

- Snake and Salmon River basins. For. Sci. 32: 79-92.
- Rehfeldt, G.E. 1992. Breeding strategies for *Larix occidentalis* : adaptations to the biotic and abiotic environment in relation to improving growth. Can. J. For. Res. 22: 5-13.
- Riemenschneider, D.E. 1988. Heritability, age-age correlations, and inferences regarding juvenile selection in jack pine. For. Sci. 34: 1076-1082.
- Rudolph, T.D., H.C. Kang et R.P. Guries. 1989. Realized genetic gain for 2nd-year height in jack pine. Can. J. For. Res. 19: 707-714.
- Rudolph, T.D., et C.W. Yeatman. 1982. Genetics of jack pine. USDA For Serv. Res. Pap. WO-38.
- White, T.L. et G.R. Hodge. 1989. Predicting breeding values with applications to forest tree improvement. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston-London, 367 p.
- White, T.L. et G.R. Hodge. 1992. Test designs and optimum age for parental selection in advanced-generation progeny tests of slash pine. Silvae Genet. 41: 293-302.
- Yeatman, C.W., 1984. The genetics of jack pine management. Réunion Comité conjoint Canada Ontario sur les ressources forestières, 18-20 octobre 1983. Timmins, Ont. p. 9-13.

REVUE DES PROGRAMMES ET STRATÉGIES D'AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE DES MÊLÈZES

Gilles Vallée et Ante Stipanovic
Ministère des Forêts, Service de l'amélioration des arbres,
2700, rue Einstein, Sainte-Foy, Québec G1P 3W8
(Texte traduit de l'anglais)

Résumé

Ce document fait le point sur la situation actuelle et sur l'avenir des programmes de reforestation et d'utilisation du bois des mélèzes au Canada. Les principaux problèmes d'insectes et de maladies sont mentionnés et les programmes ou stratégies d'amélioration génétique sont décrits par province. Les programmes d'amélioration génétique décrits visent le mélèze de l'Ouest (*Larix occidentalis* Nutt.) en C.-B. et en Alberta; le mélèze laricin (*L. laricina* (Du Roi) K. Koch) en Alberta, en Ontario, au Québec, au N.-B., à l'I.-P.-É. et à Terre-Neuve; le mélèze de Sibérie (*L. sibirica* Ledeb.) en Alberta, en Saskatchewan et au Manitoba; et les mélèzes d'Europe (*L. decidua* Mill), du Japon (*L. kaempferi* (Lamb.) Carr) et leurs hybrides en Ontario, au Québec et dans les Maritimes. En ce qui concerne les mélèzes de l'Ouest, laricin et de Sibérie, la stratégie d'amélioration génétique est basée sur des vergers à graines de semis ou des vergers à graines clonales, combinés à des tests de descendances uniparentales, de manière à évaluer l'aptitude générale à la combinaison. En ce qui concerne le mélèze d'Europe, le mélèze du Japon et leurs hybrides, la stratégie d'amélioration génétique est basée sur des modèles d'hybridation inter et intraspécifiques entre arbres sélectionnés, de manière à réaliser une amélioration intraspécifique ainsi qu'à évaluer l'aptitude spécifique à la combinaison en vue de la production d'hybrides interspécifiques.

Introduction

Ce rapport revise brièvement les programmes d'amélioration génétique des espèces de mélèze au Canada et présente les grandes lignes des stratégies d'amélioration génétique utilisées pour chaque programme. L'information présentée dans le cadre du rapport a été réunie grâce à l'envoi d'un questionnaire à 23 généticiens et spécialistes de l'amélioration génétique des arbres au Canada, en les invitant à fournir des détails sur les programmes d'amélioration génétique du mélèze au sein de leurs régions. De plus, le questionnaire demandait de fournir des précisions sur la situation des mélèzes dans les programmes de reforestation, dans la consommation de bois et sur les maladies, insectes et prédateurs. Toute les données signalées dans ce document concernant la situation des mélèzes ainsi que l'avancement du programme d'amélioration génétique au Can-

ada ont été fournies par les correspondants, dont la liste figure dans les remerciements (les références n'étaient pas toujours disponibles).

Au Canada, les principales espèces de mélèze et leurs hybrides sur lesquelles portent les programmes d'amélioration génétique sont : mélèze d'Europe (*Larix decidua* Mill.), mélèze du Japon (*L. kaempferi* (Lamb.) Carr), mélèze de Sibérie (*L. sibirica* Ledeb.) mélèze laricin (*L. laricina* (Du Roi) K. Koch), mélèze de l'Ouest (*L. occidentalis* Nutt.), et l'hybride entre les mélèzes d'Europe et du Japon. Le document ne vise pas à colliger toutes les données disponibles sur la génétique du mélèze; les travaux de nombreux autres auteurs ont déjà été consacrés sur ce thème (source anonyme (1992a et b), Boyle *et al.* (1989), Fowler (1986a), Fowler (1986b), Fowler *et al.* (1988), Morgenstern *et al.* (1984), Ying et Morgenstern (1991), *etc.*).

Les mélèzes et les programmes de reforestation

Le nombre de semis de mélèzes plantés au Canada en 1991 était d'environ 5,0 millions. À l'exception de l'Î.-P.-É. où les semis de mélèze représentaient 12,9 p. 100 du total, la proportion de semis de mélèze variait de 3,5 p. 100 à moins de 1 p. 100. En C.-B., en Ontario et au Québec, de 1 à 2 millions de semis sont plantés chaque année. Au niveau des autres provinces, les chiffres sont inférieurs à 500 000 semis. Les niveaux de reforestation de semis de mélèze sont en règle générale très faibles pour toutes les régions du Canada et, selon les augmentations prévues, les chiffres des prochaines années devraient, au maximum, doubler.

Consommation de bois de mélèze

Les résultats de l'étude sur l'utilisation du bois de mélèze au Canada sont les suivants :

À Terre-Neuve, moins de 5 p. 100 de la consommation totale de l'industrie du papier journal correspond au mélèze; à l'échelle locale, on recense une demande de bois d'oeuvre en petite quantité, mais aucune augmentation n'est prévue au cours des 10 prochaines années.

Les producteurs de l'Î.-P.-É. expédient 3 500 m³ de bois de pâte de mélèze par année sur le continent. À l'échelle locale, le bois sert à la fabrication de caisses pour les pommes de terre de semences et à la construction navale (12 000 m³ par année), au chauffage domestique (22 000 m³ par année) et au chauffage institutionnel sous forme de copeaux (10 000 tonnes brut). Au cours des 10 prochaines années, la consommation devrait demeurer constante, mais on prévoit une augmentation dans environ 20 ans au fur et à mesure où les plantations produiront du matériel de qualité supérieure.

Les usines du N.-B. et de la N.-É. consomment du bois de mélèze pour la production de pâte kraft ou,

incorporé en mélange (en faible proportion) pour d'autres processus de fabrication. Le mélèze est utilisé comme bois d'oeuvre et classé dans la catégorie «espèces nordiques». La consommation de bois de mélèze ne devrait pas augmenter.

L'industrie du Québec utilise une faible quantité de mélèze en mélange dans le papier kraft; à l'échelle locale, le mélèze est utilisé pour le bois d'oeuvre en faible quantité et il est vendu au même prix que l'épinette ou le sapin. On ne prévoit pas d'augmentation de la consommation de bois de mélèze à court terme.

L'industrie de l'Ontario a utilisé 1 477 m³ de mélèze pour la fabrication de pâte, 480 m³ de grumes de sciage, 660 m³ de tiges en longueur (probablement pour des poteaux) en 1991 et 1992. La consommation de bois de mélèze dans l'avenir ne changera pas et demeurera aussi marginale qu'elle l'est actuellement (2 617 m³ contre un total de 18 millions de mètres cubes de bois récoltés en 1991-1992).

Manitoba et Saskatchewan : aucune donnée n'a été fournie sur la consommation de mélèze.

L'industrie de l'Alberta ne consomme pas à l'heure actuelle de bois de mélèze; toutefois, ce type de bois est en demande pour la fabrication de poteaux de clôture. On ne prévoit aucune modification de la consommation de mélèze au cours des 30 prochaines années ou presque, étant donné l'absence de modification de la situation de l'offre.

En C.-B., le bois de mélèze de l'Ouest est en demande sous forme de bois de charpente, dans le groupe d'essences mélèze/douglas taxifolié. Parmi les utilisations spécialisées, citons les poutres et les fermes lamellées-collées qui se vendent à des prix très intéressants. La récolte annuelle de mélèze de l'Ouest est d'environ 500 000 m³ et elle représente une faible proportion du total de la province. On ne prévoit pas de

grande modification de la consommation au cours des 10 prochaines années.

De ce sondage sur la consommation du bois de mélèze au Canada, on peut conclure que les espèces de mélèze représentent une faible part des activités de l'industrie forestière. Deux motifs justifient cette faible consommation du bois de mélèze :

- a) les peuplements naturels de mélèze sont, en général, une composante mineure des forêts naturelles et ils sont souvent parsemés sur de très vastes superficies;
- b) dans le cas des produits de pâtes et papiers et des produits de sciage, les caractéristiques du bois en restreignent la consommation sous forme de pâte en mélange avec autres espèces de résineux plus répandues dans les peuplements naturels et donc plus utilisées par l'industrie.

Pour augmenter le niveau de consommation de mélèze, le bois doit être traité séparément, mais le volume de bois disponible est souvent trop faible pour justifier l'exploitation distincte d'une usine traditionnelle dans la plupart des régions du Canada. Pour stimuler la consommation de bois de mélèze, des produits différents de ceux consommés traditionnellement doivent être conçus, en accordant une importance particulière aux produits à forte valeur ajoutée, de manière à compenser l'augmentation des coûts du bois dû à l'éparpillement des peuplements.

Problèmes de déprédateurs dans les plantations de mélèze

Les principaux problèmes de déprédateurs mentionnés par les correspondants étaient les suivants : a) la brûlure des aiguilles Meria (*Meria laricis* Vuill.), le portecase du mélèze (*Coleophora laricella* Hbn.), et le faux-gui (*Arceuthobium laricis* [Piper] St. John) pour les forêts et plantations de mélèze en C.-B.); et la tenthrède du mélèze

(*Pristiphora erichsonii* Hartig.), le portecase du mélèze, le dendroctone du mélèze de l'Est (*Dendroctonus simplex* Lec.), le charançon des pousses du mélèze (*Argyresthia laricella* Kft.) la cécidomye des cônes (*Resseliella* spp.), et le porc-épic (*Erethizon dorsatum* L.) pour le mélèze de l'Est et d'autres essences exotiques de mélèze. De plus, le chancre européen du mélèze (*Lachnellula willkommii* Hartig) a été introduit dans les provinces des Maritimes.

Programmes et stratégies d'amélioration au Canada

Colombie-Britannique

En Colombie-Britannique, on recense trois espèces naturelles de mélèze : le mélèze laricin dans la forêt boréale, le mélèze subalpin (*Larix lyallii* Parl.) à la limite de la zone des forêts dans les Rocheuses et dans la chaîne des «Columbia Mountains» en bas du 52^e degré de latitude nord ainsi que dans le nord de la chaîne des «Cascades Mountains»; et le mélèze de l'Ouest, qui présente une composante importante de la série physiographique de toute la région supérieure du bassin de la rivière Columbia et des montagnes de l'Okanogan. Seul le mélèze de l'Ouest a une importance sur le plan commercial, mais il constitue une composante mineure des ressources forestières de la province.

Dans son aire de répartition naturelle, le mélèze de l'Ouest est une espèce de bois d'oeuvre importante possédant diverses caractéristiques qui en font une espèce intéressante à des fins de reforestation. Le reboisement du mélèze de l'Ouest a été limitée par des problèmes d'approvisionnement en semences (irrégularité des récoltes due aux fleurs endommagées par le gel du printemps, faible production de graines, etc.); toutefois, on espère que de tels problèmes seront réglés grâce aux vergers à graines (en milieu naturel ou en serres). Le mélèze de l'Ouest est la seule espèce de mélèze soumise à un programme d'amélioration génétique des arbres

des régions forestières de Nelson et de Kamloops en C.-B. L'objectif du programme consiste à mettre au point des variétés d'arbres bien adaptés, avec amélioration de la croissance en hauteur, en diamètre et en volume et de la qualité des tiges, tout en assurant des niveaux acceptables de diversité génétique et de qualité du bois.

Le programme est basé sur des vergers à graine clonals établis au moyen de greffes d'arbres-plus sélectionnés au sein des peuplements naturels. L'objectif visé est de 550 arbres parents. À ce jour, plus de 350 arbres parents (cinq arbres par peuplement) ont été sélectionnés et implantés par greffe sur le terrain au sein de deux vergers à graines, comprenant 176 et 147 clones selon les deux secteurs d'amélioration génétique délimités en fonction de critères biogéoclimatiques.

En 1993, un test de 332 descendances récoltées sur les arbres sélectionnés sera établi sur neuf sites. Chaque famille sera implantée sur un minimum de quatre sites de haute qualité dans sa zone d'origine. Le test permettra une sélection récurrente basée sur les aptitudes générales à la combinaison des clones au sein des vergers à graines. On prévoit en moyenne des gains de 20 p. 100 en hauteur avec des variations entre 11 et 35 p. 100 sur la base des valeurs reproductives correspondant à la hauteur à 7 ans et sur un taux de sélection de 10 p. 100, selon les résultats obtenus aux É.-U. avec le mélèze de l'Ouest (Com. pers. B. Jaquish).

De plus, des tests de provenance de 128 sources de semences récoltées à l'échelle de l'ensemble de l'aire de répartition sont actuellement réalisés dans le cadre d'un projet conjoint de recherche sur la génécologie du mélèze de l'Ouest (USFS/BCFS). Le principal objectif de ce projet conjoint consiste à décrire les modèles de variation génétique correspondant à la croissance et à la capacité d'adaptation de manière à améliorer la précision de la délimitation des secteurs d'amélioration génétique et des règles de transfert des semences. Parmi les autres études réalisées,

citons l'induction florale, la manipulation du pollen, les vergers de reproduction ou de production de semences en pots ou en milieu naturel, l'embryogenèse somatique et la corrélation juvénile-adulte de la densité basale du bois.

Alberta

En Alberta, trois espèces de mélèze font partie d'un programme d'amélioration génétique : le mélèze laricin, le mélèze de Sibérie et le mélèze de l'Ouest. Chaque espèce possède ses objectifs particuliers. En ce qui concerne le mélèze laricin, l'amélioration génétique relative à la croissance, au rendement, à la rectitude des tiges et à la qualité du bois seront les objectifs visés. Le programme vise également à connaître les modèles de variation des populations en Alberta, de manière à déterminer les zones des semences et à identifier des sources de semences de qualité supérieure pour la reforestation, lorsque cela est faisable. La stratégie d'amélioration génétique du mélèze laricin est basée 1) sur la récolte de semences naturelles provenant de secteurs désignés comme sources de semences; et 2) sur la sélection massale d'arbres de qualité supérieure dans des peuplements naturels ainsi que sur la création d'un verger clonal de dimensions réduites, pour la région d'amélioration génétique du centre de l'Alberta. Sept essais de 20 à 22 sources de semences ont été réalisés durant 1985-1987 à l'échelle de l'Alberta ainsi qu'un verger à graines clonales (0,75 hectares), qui inclut les greffes de neuf arbres sélectionnés (d'autres arbres seront ajoutés à une étape ultérieure). Une production annuelle de 5 kg de semences améliorées est prévue pour la région centrale. On s'attend à ce que le programme soit étendu à d'autres régions, si la participation de l'industrie le permet.

En ce qui concerne le mélèze de Sibérie, les tests de provenances servent à identifier des sources de semences adéquates pour les diverses écorégions, ainsi qu'à réaliser une amélioration génétique par voie de sélection et d'hybridation.

La stratégie d'amélioration est basée a) sur des tests de sources de graines en vue d'une introduction massale au sein des diverses régions de l'Alberta en combinaison avec b) une sélection d'arbres de la souche Raivola de Finlande et de plantations locales. À ce jour, quatre tests de 12 sources de semences provenant d'URSS, deux tests de 20 à 30 familles obtenues par pollinisation libre et deux plantations composées de 19 descendances biparentale et 56 familles obtenues par autopolinisation ont été réalisés. Ces tests ainsi que d'autres jeunes plantations de l'Alberta permettront de fournir les arbres de qualité supérieure sur lesquels seront prélevées les greffons nécessaires pour compléter le verger à graines de semis (0,2 hectares) constitué au moyen de semences d'un verger à graines provenant de la souche Raivola. On prévoit une production annuelle de 10 kg de graines améliorées dans ce verger. Les premiers résultats des essais réalisés sur le terrain indiquent que dans le nord de l'Alberta, le mélèze de Sibérie croît 30 p. 100 plus vite en hauteur que le mélèze laricin, mais la sélection des sites de plantation doit être effectuée de manière très rigoureuse.

En ce qui concerne le mélèze de l'Ouest, la stratégie consiste à améliorer la résistance au froid en établissant un verger à graines clonal pour le sud-ouest de l'Alberta et les écorégions de forêts montagneuses, par la sélection et la propagation des arbres rustiques trouvés dans les populations situées en bordure d'Alberta. À partir de greffons de ces arbres rustiques, un verger à graines clonal permettant la production annuelle de 5 kg de semences améliorées sera établi. À ce jour, 15 ortets ont été propagés et on prévoit la transplantation de 300 greffes en 1994. À noter que dans le cadre d'un essai réalisé sur huit sources de semences de C.-B. en 1980, tous les arbres ont souffert de dégâts importants du gel et pratiquement tous les arbres sont morts.

Saskatchewan et Manitoba

En Saskatchewan et au Manitoba, le seul programme d'amélioration génétique du mélèze est réalisé par le Farm Rehabilitation Administration Shelterbelt Centre à Indian Head en Saskatchewan. Le mélèze de Sibérie est la principale espèce étudiée par le programme qui a débuté en 1983 (Schroeder, 1987). Les objectifs du programme consistent à mettre au point des arbres caractérisés par un taux de croissance supérieur, une meilleure résistance aux insectes et une tolérance accrue à la sécheresse, arbres qui seront plantés pour constituer des brises-vent protégeant les fermes et les champs agricoles ou des plantations afin d'améliorer le microclimat et constituer des habitats pour la faune. La forme et la densité des couronnes sont les caractères considérés dans la sélection.

Des vergers à graines de semis sont établis en utilisant les descendances de phénotypes supérieurs sélectionnés au sein des populations de mélèze de Sibérie du Shelterbelt Centre (particulièrement une plantation constituée en 1912 à partir de semences récoltés dans des régions voisines des montagnes de l'Oural). Pour élargir la diversité génétique des sources de graines, des récoltes ont été effectuées en Sibérie. Vingt provenances incluses dans 10 tests et 62 descendances uniparentales incluses dans deux tests, et d'autres types de plantations de mélèze de Sibérie et de sept autres essences de mélèze font actuellement l'objet d'études en Alberta, en Saskatchewan et au Manitoba. On prévoit finalement l'établissement d'un verger à graines clonal accompagné de tests de descendances de manière à profiter des gains génétiques entre provenances par une sélection d'arbres dans les meilleures provenances.

Ontario

Le programme d'amélioration génétique du mélèze en Ontario n'est actif que dans la zone 6

des six zones d'amélioration des arbres définies en Ontario par le Conseil pour l'amélioration des arbres de l'Ontario (B. Elliott, comm. pers.). La zone 6 comprend la région du sud et les districts de Parry Sound, d'Algonquin Park, de Pembroke et de Bancroft dans la région du centre. Le programme d'amélioration des arbres de la zone 6 fait actuellement l'objet de révisions et l'information relative au programme d'amélioration génétique du mélèze dont nous rendons compte dans ce document est basée sur des projets antérieurs. Les mélèzes laricin, d'Europe et du Japon sont les espèces étudiées dans le cadre du programme d'amélioration génétique.

En ce qui concerne le mélèze laricin, le programme inclut un volet de base et un volet intensif. Les objectifs du programme de base consistent à assurer la conservation génétique et le contrôle des sources de semences à des fins de régénération artificielle. Dans le cadre du programme intensif, l'objectif consiste à améliorer la croissance, la forme des tiges et la capacité d'enracinement des boutures. Compte tenu de la facilité de l'enracinement et des difficultés que pose l'obtention de semences pour la reforestation, la stratégie à long terme d'amélioration vise l'élaboration d'une stratégie de propagation massale par boutures provenant de familles choisies par voie de cycles répétitifs de sélection, d'amélioration génétique et de tests. Les familles seront produites selon un programme de croisements polycross portant sur une population de 200 arbres-plus sélectionnés dans la zone 6, clonés par greffage et affectés aux collections ou aux serres de croisements. Des familles seront testées dans le cadre de tests à court et long termes. Sur la base des résultats des tests à court terme, les 10 clones les mieux classés seront utilisés dans des croisements afin de produire les semis qui fourniront les boutures pour le programme de propagation. Les résultats des tests à court terme serviront également à répartir les clones selon un modèle de croisement choisi de manière à produire du matériel de sélection pour la génération d'amélioration génétique suivante.

Une production annuelle de 500 000 boutures racinées est prévue et on espère pouvoir réaliser un gain de 18 p. 100 (probablement en volume) conformément aux résultats annoncés dans la littérature.

En plus de cette stratégie, un verger à graines clonal de 3,2 hectares a été établi dans la région est de l'Ontario. De plus, on envisage la propagation de supersemis testés sous forme de clones en pépinière sur une période de 5 ans dans le cadre d'un programme à court terme.

La stratégie du programme d'amélioration génétique du mélèze du Japon et du mélèze d'Europe consiste à tester les croisements intraspécifiques d'arbres-plus et, en fonction des résultats des tests de descendance, d'utiliser les meilleurs arbres-plus pour des croisements interspécifiques de manière à produire des semis hybrides. On alimentera ainsi un système de propagation par bouture afin de produire des plants. Des croisements hybrides seront réalisés dans une serre de reproduction et, pour l'instant, le projet sera limité à la première génération.

Sur la base des résultats voulant que plusieurs clones produisent systématiquement des fleurs femelles année après année et que les fleurs mâles peuvent être facilement produites en pliant les branches, un schéma de croisements des testeurs femelles a été retenue afin d'évaluer les valeurs génétiques des arbres-plus clonés.

Un verger à graines clonal de mélèze hybride a été établi en 1983 afin de produire des semences de *L. x eurolepis*. Le verger inclut 677 greffes espacées de 8x8 m sur 5,2 hectares. Le modèle vise à permettre la production de semences de mélèze hybride en entourant entièrement les clones de mélèze d'Europe autostériles avec les clones de mélèze du Japon.

La société E.B. Eddy Forest Products Ltd. d'Espanola en Ontario, a également établi en 1989 un petit verger à graines clonal composé de

288 ramettes de mélèze laricin (62 clones x 4 répétitions). L'entreprise prévoit à l'heure actuelle la plantation de 50 000 semis de mélèze par année.

En Ontario, des travaux de recherche en génétique sont également réalisés sur les mélèzes par des scientifiques de l'Institut forestier national de Petawawa, Ressources naturelles Canada. La synthèse des tests d'espèces, de provenances et de descendances des mélèzes a été publiée (Boyle *et al.*, 1989); elle inclut des données et des résultats précieux, particulièrement en ce qui concerne les mélèzes d'Europe, du Japon, de Sibérie, laricin et les hybrides. Des recherches sur l'embryogenèse somatique et le génie génétique sont réalisées à l'Institut. Cet institut a contribué à l'établissement de tests dans d'autres provinces, en assurant lui-même l'implantation des tests ou en distribuant les semis ou les graines aux organismes provinciaux ou à d'autres organismes régionaux fédéraux. L'Institut a également contribué au programme d'amélioration génétique du mélèze des provinces et du secteur privé en fournissant de l'information scientifique et technique, ainsi que des greffons d'arbres sélectionnés et en établissant des vergers à graines.

Québec

Au Québec, en dépit du faible intérêt actuel pour la plantation des mélèzes, le ministère des Terres et des Forêts a convenu il y a 20 ans de lancer un programme d'amélioration génétique. Les mélèzes sont considérés comme des espèces à croissance rapide susceptible de concurrencer les pins américains plantés dans le sud-est des É.-U. Les programmes d'amélioration génétique sont principalement consacrés aux mélèzes laricin, d'Europe, du Japon et hybrides. Le mélèze de Sibérie et ses hybrides avec les mélèzes du Japon et d'Europe font l'objet de tests dans le nord du Québec (climax de la sapinière et de la pessière).

Le mélèze laricin est l'espèce préférée pour les plantations du nord du Québec et les sites mouilleux du sud du Québec, étant donné que les mélèzes du Japon et d'Europe ont un taux de survie très faible lorsqu'ils sont plantés sur des sols hydromorphes. Quant aux sols mésiques et légèrement secs, les mélèzes d'Europe, du Japon et hybrides produisent plus de bois que le mélèze laricin, pour un nombre d'arbres équivalent à l'hectare, étant donné que leur croissance en diamètre est supérieure (Vallée et Stipanovic, 1983).

En ce qui concerne le mélèze laricin, le programme d'amélioration génétique est basé sur des vergers à graines de semis avec des descendances uniparentales ou sur des vergers à graines de clones en fonction de la distribution, de la superficie et de l'origine des populations naturelles de la région couverte par le verger. Dans les régions où on recense de nombreux peuplements de grande superficie de mélèze laricin avec une faible possibilité de consanguinité, les graines obtenues de pollinisation libre sont récoltées sur les arbres-plus. Chaque verger à graines de semis est accompagné de 1 à 3 tests de descendances selon la diversité écologique de la région que sera desservie par le verger.

Un verger à graines clonal a été établi dans la région de la Gaspésie. Dans cette région, les populations de mélèze laricin sont réparties sur une bande étroite qui longe la rive nord de la Baie-des-Chaleurs et suit la colonisation des terres par l'agriculture. Beaucoup de peuplements proviennent d'un nombre limité d'arbres épargnés par la colonisation et l'infestation du mélèze par le tenthrède; ils représentent donc un risque élevé de consanguinité. Le verger sera probablement éclaircie à deux reprises : dans un premier temps sur la base du phénotype des clones et dans un second temps sur la base d'un test des descendances uniparentales récoltées sur les clones présents dans le verger à graines. Quatre vergers à graines ont été établis, soit un total de 13,5

hectares avec un potentiel de production annuelle de 4,2 millions de semis (Lamontagne, 1992).

Étant donné le faible nombre de semis de mélèze laricin plantés à l'heure actuelle, aucun verger de seconde génération n'est prévu. Toutefois, 80 arbres sélectionnés à partir d'un test de provenance ont été greffés et inclus dans une banque clonale.

En complément des vergers à graines déjà établis, deux tests de descendances plantés en 1982 seront convertis en vergers à graines. Ils incluent 403 et 459 descendances uniparentales récoltées respectivement à partir de 30 et 31 provenances du Québec réparties entre les 45^{ème} et 49^{ème} degré de latitude nord. Ces tests sont effectués dans la région du Lac Saint-Jean et dans la région de l'Estrie (Cantons de l'Est) et sont combinés à deux tests de provenances établis en 1977; l'un dans la région du Québec avec 71 provenances et l'autre dans la région de Gaspé avec 60 provenances. Ces tests serviront à délimiter les zones de récolte de semences et les régions de provenances recommandées pour la province de Québec.

La stratégie d'amélioration génétique des mélèzes d'Europe, du Japon et hybrides comporte deux étapes. Au cours de la première étape, des vergers à graines de semis et clonal ont été établis au moyen de greffes et de familles uniparentales provenant d'arbres-plus du Québec et de l'Ontario. En règle générale, les arbres-plus ont été sélectionnés au niveau des meilleures plantations connues et à partir des provenances ou des descendances les mieux cotées à la suite des tests. Le ministère québécois des Forêts a établi trois vergers à graines de mélèze d'Europe et un de mélèze du Japon sur 8,9 et 1,8 hectares respectivement. Le verger à graines du mélèze du Japon a été établi en collaboration avec la compagnie Produits Forestiers Canadien Pacifique Ltée.

Pour produire les hybrides, des vergers expérimentaux ont été créés au moyen de semis de provenances connues ou de clones sélectionnés, en suivant une stratégie particulière afin d'exposer les arbres mères au pollen de pères sélectionnés. À titre d'exemple, au sein d'un verger de production de l'hybride *L. decidua* x *L. kaempferi*, chaque arbre mère de *L. decidua* a été entourée de quatre lignes de *L. kaempferi*. La vérification de la production des semences hybrides n'a pas été réalisée étant donné la faible production de cônes. Un verger à graines clonal et deux vergers à semis ont été établis sur la base d'un tel modèle.

Au cours d'une seconde étape, qui est actuellement en cours de réalisation, des croisements interspécifiques entre clones de mélèzes d'Europe et du Japon sélectionnés sont effectués de manière à identifier les clones qui présentent la meilleure aptitude spécifique à la combinaison (ASC). Les meilleurs croisements évalués à partir des tests de descendances seront reproduits afin de constituer une réserve limitée de semences hybrides et de produire des pieds-mères en vue de la production de boutures. Jusqu'ici, les croisements ont été effectués au niveau de banques de clones extérieures; toutefois, les ramets provenant de 20 clones sélectionnés de chacune des espèces sont cultivés actuellement en serre de croisements. Un plan de croisements intraspécifiques semi-dialèles et de croisements interspécifiques dialèles complètes sera appliqué sur ces clones. Les descendances seront vérifiées afin d'évaluer l'aptitude spécifique à la combinaison. Les semis des meilleures familles d'espèces et d'hybrides feront l'objet d'une propagation massale par bouture ou, si la technologie disponible le permet, une production massale de semences des meilleurs croisements sera effectuée dans un verger à graines en serre. Pour appuyer le programme d'amélioration génétique des mélèzes du Japon et d'Europe, de nombreux tests de descendances et de provenances ont été établis au Québec. Des géotypes seront choisis dans l'avenir à partir de ces tests.

Nouveau-Brunswick et Île-du-Prince-Édouard

En ce qui concerne le N.-B. et l'Î.-P.-É., Fowler (1986a) recommande deux stratégies d'amélioration génétique très complètes pour le mélèze laricin. La première stratégie est basée sur un verger à graines clonal, avec trois générations successives réparties sur une période de 36 ans. La stratégie vise exclusivement l'aptitude générale à la combinaison (AGC). L'autre stratégie est basée sur la propagation massale par boutures des semis provenant des meilleures descendances obtenues par croisements polycross pour la première génération puis en suivant un plan de croisements semi-diallèle non-connexes pour les générations subséquentes, de manière à vérifier également l'aptitude spécifique à la combinaison. Les deux stratégies débutent par la sélection de 300 arbres-plus au N.-B. et dans les régions voisines de l'Î.-P.-É. et du Maine. Le Conseil d'amélioration des arbres du N.-B. a mis en oeuvre la stratégie des vergers à graines clonals; 269 arbres plus ont été sélectionnés, greffés et plantés dans des vergers et dans des parcs de croisements des coopérants dès 1987. La stratégie est illustrée sur le diagramme de la figure 1 tiré des travaux de Fowler (1986a).

Dans un premier temps, chaque clone provenant d'un arbre-plus sera croisé avec un mélange de pollen type (polycross) afin de produire des semis en vue des tests de descendances. Ces tests fourniront de l'information sur AGC afin d'éclaircir les vergers à graines clonals et d'identifier les familles biparentales supérieures obtenues aussi par croisement à paire unique entre les clones de la même aire de production de semence. Les semis provenant de croisements à paire unique sont plantés dans des parcelles afin de fournir du matériel pour la sélection et l'amélioration génétique de seconde génération. De ces plantations, les 400 meilleurs phénotypes (c.-à-d. 4 pour chacune des 100 meilleures familles) seront sélectionnés et répartis en 20 groupes d'amélioration génétique de 20 arbres, les arbres provenant de la même aire de production de sem-

ence étant affectés au même groupe. Sur la base des classements dans le test de familles, 30 à 40 clones non apparentés, les meilleurs sur le plan phénotypique, seront sélectionnés au sein des 400 phénotypes de base de manière à établir un verger à graines clonal de seconde génération.

Ces 20 groupes d'amélioration génétique de 20 arbres seront utilisés pour le second cycle d'amélioration génétique, durant lequel des plans de croisements diallèles partiels et de croisements polycross fourniront de l'information pour l'éclaircissement des vergers à graines de seconde génération ainsi que pour les générations d'amélioration génétique subséquentes (Figure 1).

L'objectif de ce programme d'amélioration génétique du mélèze laricin consiste à améliorer le taux de croissance, la rectitude des tiges et éventuellement, la densité relative du bois. À ce jour, trois coopérants ont établi des vergers à graines : le ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie du N.-B. (un verger de 9,0 hectares), J.D. Irving, Ltd. (un verger de 9,8 hectares) et le ministère de l'Énergie et des Forêts de l'Î.-P.-É. (deux vergers, 2,0 hectares). Seule une génération est prévue pour l'instant. Des tests de descendances sont réalisés avec la plupart des coopérants. Fraser Inc. a constitué une modeste banque clonale d'environ 50 clones qui pourront être utilisés dans l'avenir pour produire des semences par croisements dirigés, si nécessaire.

Dans les provinces des Maritimes, les bonnes provenances des mélèzes du Japon et hybride surpassent, pour la production ligneuse, le mélèze laricin sur les sites bien drainés (Fowler, 1986b). Toutefois, et c'est plus important encore, l'hybride a prouvé qu'il était plus résistant au chancre du mélèze (*Lachnellula willkommii* (Hartig) Dennis), qu'on retrouve maintenant dans certains secteurs des provinces maritimes. Fowler (1986b) a également proposé une stratégie exhaustive pour l'amélioration génétique des mélèzes du Japon et d'Europe avec production d'hybrides améliorés

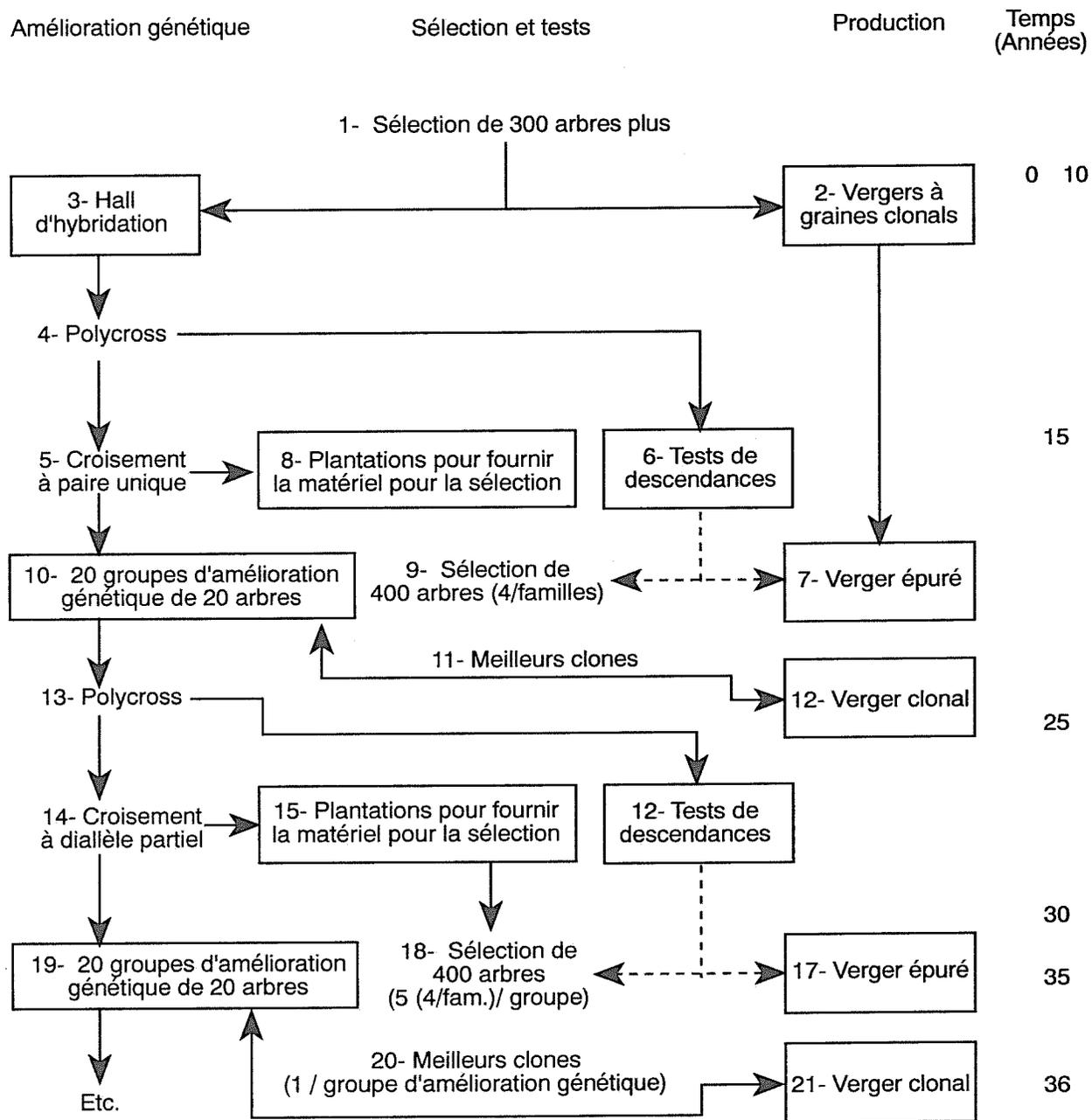


Figure 1. Schéma de la stratégie d'amélioration génétique du mélèze laricin — programme CAANB,

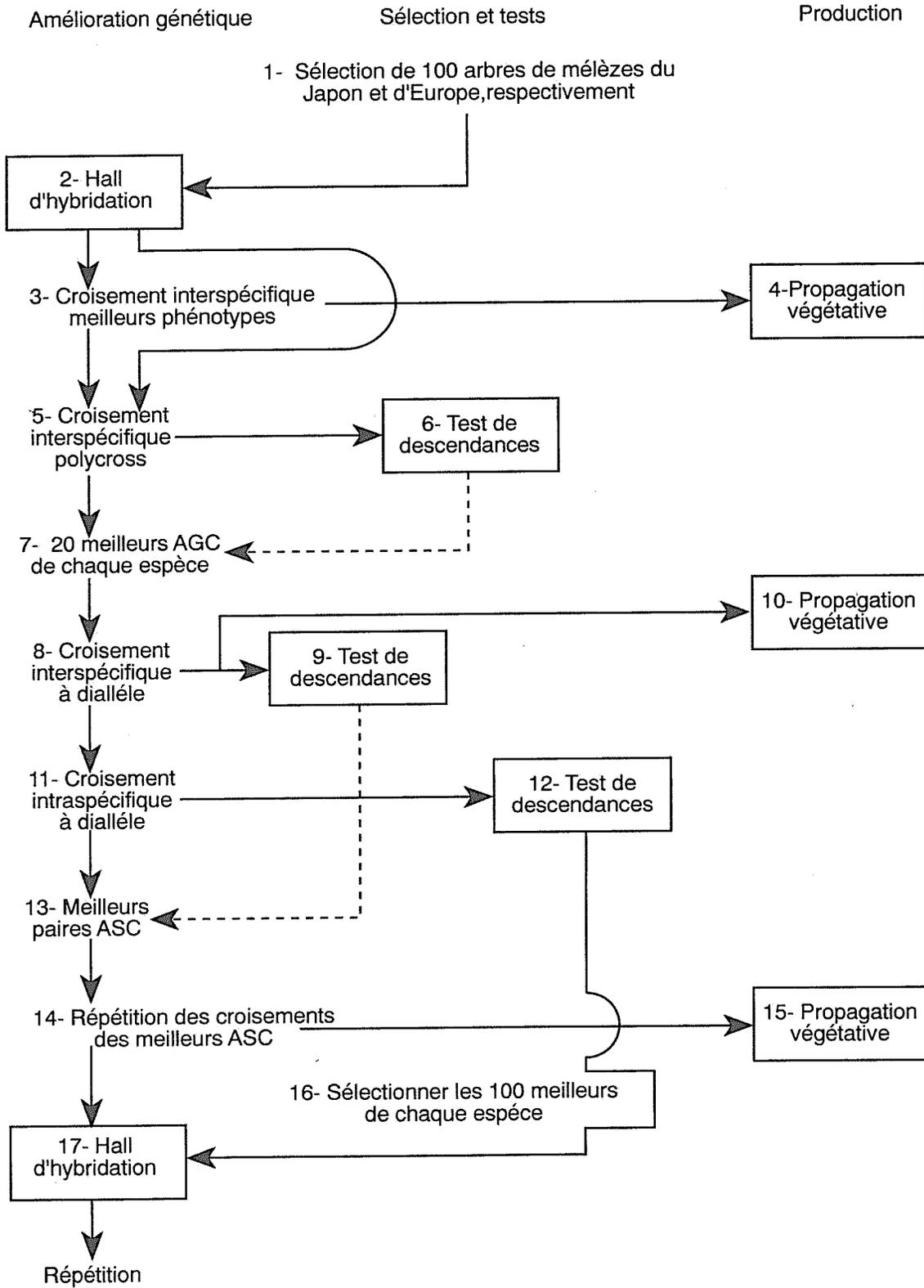


Figure 2. Schéma pour la production du mélèze hybride amélioré *eurolepis* (d'après Fowler 1986a).

sur plusieurs générations. La stratégie élaborée par Fowler (1986b) est présentée sous forme schématique à la Figure 2.

Sommairement, la stratégie proposée par Fowler (1986b) est basée sur l'amélioration de chaque espèce par identification, au sein d'un groupe de 100 arbres sélectionnés, les arbres qui présentent la meilleure aptitude générale à la combinaison interspécifique, dans un premier temps, puis la meilleure aptitude spécifique à la combinaison au cours d'étapes ultérieures. Les 20 arbres sélectionnés pour chaque espèce en raison de leur AGC et de leur ASC font l'objet de croisements interspécifiques afin d'identifier les arbres qui présentent la meilleure aptitude spécifique à la combinaison. Les mêmes arbres font l'objet de croisements intraspécifiques selon un modèle semi-diallèle, puis évalués dans des tests de descendance afin de déterminer les 100 meilleurs arbres de chaque essence et former ainsi la population de la deuxième génération d'amélioration. Ainsi, l'amélioration intraspécifique permet de fournir des génotypes améliorés à chaque étape, de manière à améliorer l'hybridation interspécifique.

En tenant compte des données disponibles, Fowler (1986b) préconise une sélection basée sur la qualité au niveau des espèces parentales, en se fiant à la vigueur des hybrides pour obtenir une amélioration de la croissance.

À ce jour, les réponses reçues des correspondants ne révèlent aucune information du Conseil d'amélioration des arbres du N.-B. sur les programmes d'amélioration génétique des mélèzes d'Europe, du Japon et hybrides. Pour ces espèces ainsi que d'autres espèces de mélèze, les principaux travaux réalisés portent sur des essais comparatifs. Toutefois, un petit verger à graines clonales de mélèze du Japon a été établi par Valley Forest Products Ltd.; il inclut 22 clones sélectionnés dans un test de provenances. Cependant la compagnie n'a plus l'intention de planter du mélèze et n'a récolté aucun cône

depuis 1984. La direction des forêts de l'Î.-P.-É. a proposé la plantation de mélèzes d'Europe, du Japon et hybrides afin de combler le déficit en billes de sciage prévu aux alentours de l'an 2020 (information réunie dans le cadre d'un rapport préliminaire par W.M. Glen).

Le Ministère des ressources naturelles Canada réalise un programme d'amélioration génétique des mélèzes hybrides et d'autres études consacrées au mélèze laricin dans les Maritimes. L'objectif consiste à produire et à tester des hybrides des mélèzes d'Europe et du Japon afin d'évaluer le rendement de ces hybrides en comparaison avec les deux espèces parentales et de préciser les meilleurs croisements. On étudie également la structure de la population des peuplements naturels de mélèze laricin afin de déterminer les modèles de variations génétiques. Il est surprenant de constater le manque d'intérêt de la part de l'industrie et des organismes provinciaux pour le mélèze hybride et le mélèze du Japon, si on tient compte de leur potentiel de production. Fowler *et al.* (1988) ont rapporté une production de 12 m³ par hectare par année à l'âge de 25 ans pour la meilleure provenance de mélèze du Japon contre 4 m³ par hectare par année pour le mélèze laricin. Ils concluent que le mélèze du Japon, aménagé sur de rotations courtes, est susceptible de produire deux à trois fois plus de bois que les autres espèces de conifères généralement plantées dans la région des Maritimes au Canada. De plus, au cours de cette étude sur le rendement et sur les propriétés du bois, Fowler *et al.* (1988) constatent que «le mélèze du Japon se scie, se sèche et se travaille bien. Son bois est valable pour la construction en général et il pourrait être admissible à une cote de classement mécanique».

Nombre d'autres projets conjoints consacrés au mélèze sont réalisés au N.-B. et à l'Î.-P.-É. par Ressources naturelles Canada et par le «University of New Brunswick». Ils incluent des essais d'espèces, la sélection de clones et des tests de provenances, des études sur la structure

génétique, ainsi que l'étude des variations génétiques entre les clones et de leur incidence sur la foresterie clonale (Park et Fowler, 1987; Fowler *et al.*, 1988; Morgenstern *et al.*, 1984; Morgenstern, 1986; Morgenstern, 1987; Ying et Morgenstern, 1990, 1991; Carswell et Morgenstern, 1992).

Nouvelle-Écosse

Le ministère des Ressources naturelles de N.-É. ne possède pas de programme d'amélioration génétique pour les mélèzes mais il procède à l'heure actuelle à l'évaluation du potentiel de ces espèces. Entre-temps, un verger de boutures de mélèze hybride constitué à partir de clones des vergers à graines établis par la Valley Forest Products Ltd. du N.-B. a été réalisé et il fournira le matériel nécessaire à la propagation végétative si nécessaire.

L'entreprise Scott Canadian Timberlands de la Nouvelle-Écosse possède un programme d'amélioration génétique des mélèzes du Japon, d'Europe et hybride. L'entreprise a planté 135 000 semis de mélèze en 1993; cela représente 7 pour 100 du programme de reforestation. Dans 5 ans, cette proportion aura augmenté à 25 pour 100. Le bois de mélèze est utilisé pour la production de pâte kraft. Les objectifs du programme consistent à «établir un verger d'hybride du mélèze du Japon/d'Europe afin de produire un pourcentage élevé de semences hybrides, de vérifier chaque croisement spécifique et d'augmenter la taille du verger en utilisant le matériel parental dont les croisements présentent le meilleur degré de vigueur hybride pour la croissance et le rendement» (Tom Matheson, Scott Worldwide Inc., comm. pers.). La stratégie du programme d'amélioration génétique est basée sur les 20 meilleurs clones de mélèze japonais qui ont fait l'objet de tests, évalués à partir de croisements polycross et sur des clones non testés de mélèze d'Europe. Les clones proviennent de tests de provenances réalisés à la «Acadia Forest Experiment Station» au N.-B. Des croisements en diallèles

partiels seront réalisés afin de tester la vigueur hybride. Le verger clonal prévu sera composé de 30 clones de mélèze du Japon (30 ramets chacun) et de 30 clones de mélèze d'Europe (10 ramets chacun). Ce verger sera basé sur un modèle de verger miniature, et tout le matériel sera déployé en rangées clonales. Le pollen sera fourni par voie de pollinisation massale supplémentaire de manière à garantir un haut taux d'hybridation et un faible taux d'autofécondation. On prévoit produire entre 750 000 et 1 million de semences viables par année à partir de ce verger et des gains génétiques de l'ordre de 25 pour 100 en hauteur par sélection des meilleurs croisements. La sélection en vue d'augmenter la résistance au chancre du mélèze pourra être incorporée au programme dans l'avenir.

Terre-Neuve

Le mélèze laricin est la seule espèce de mélèze sousmise à un programme d'amélioration génétique réalisé à Terre-Neuve. Toutefois, d'autres espèces comme les mélèzes du Japon, d'Europe, de Sibérie et hybride font actuellement l'objet de tests (Harrison, 1986). L'objectif du programme d'amélioration consiste à fournir des semences pour des reboisements de meilleure qualité et productivité que ceux obtenus des semences récoltées au sein des peuplements naturels. Les principales caractéristiques à améliorer sont le taux de croissance et la rectitude des tiges. La stratégie propose deux vergers à graines clonales pour la province, l'un desservant le Labrador et la péninsule du nord et l'autre le reste de l'île. Les deux projets seront situés à la «Wood Dale Provincial Tree Nursery» près de Grand Falls.

La stratégie est basée d'une part sur un verger à graines clonal et d'autre part sur la propagation végétative de 100 arbres-plus clonés pour chaque secteur. Cette stratégie est basée sur la stratégie alternative proposée par Fowler (1986a), (Figure 3). Les valeurs génétiques des clones seront vérifiées au moyen de tests de descendance

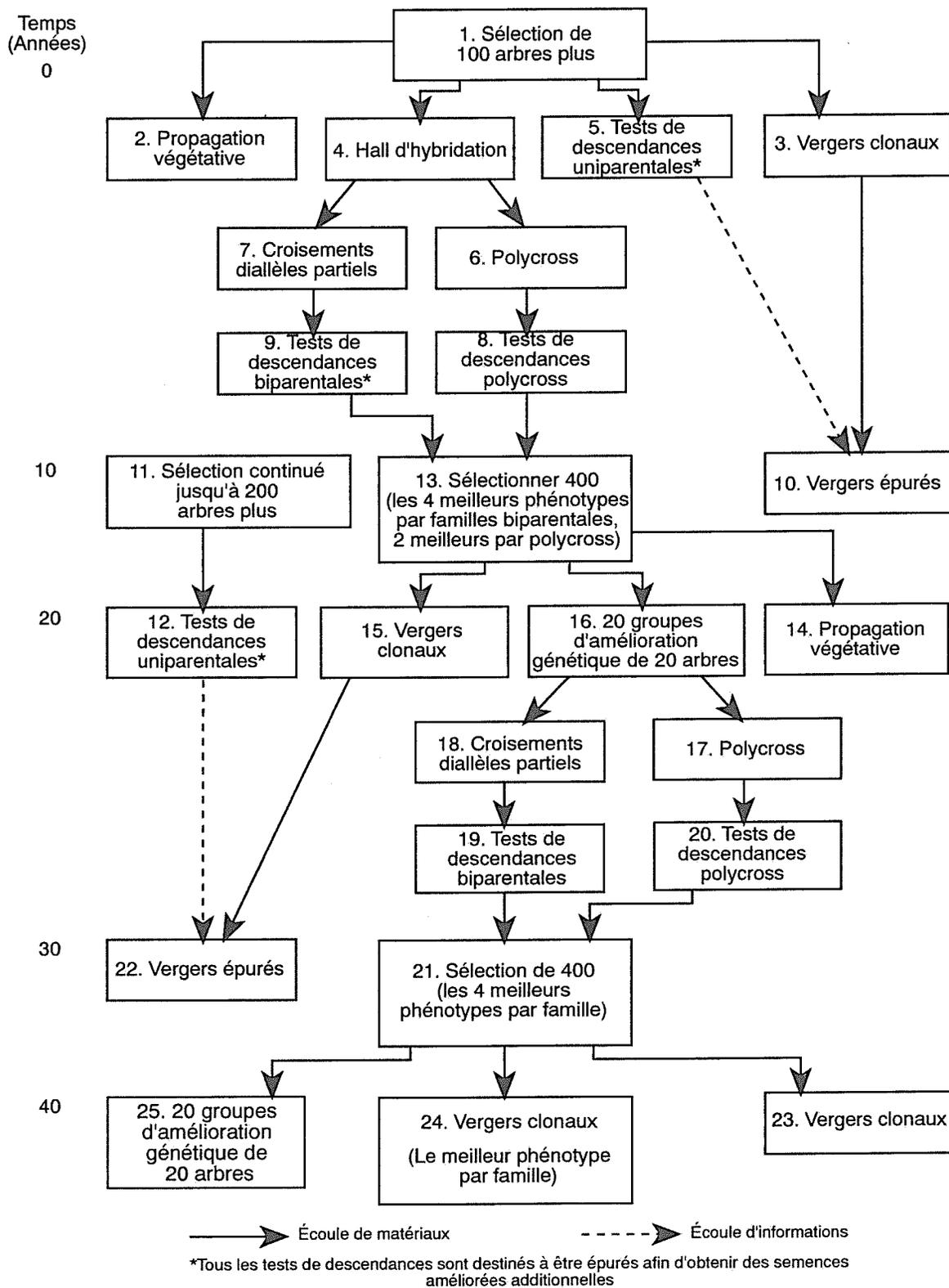


Figure 3. Schéma d'amélioration génétique du mélèze laricin à Terre-Neuve et au Labrador (source

uniparentales. Les descendances testées obtenues au moyen de croisements polycross et diallèles partiels réalisés sur 100 nouveaux arbres-plus sélectionnés permettront de produire le matériel nécessaire à la propagation végétative et aux vergers à graines de seconde génération. Ce matériel sera ensuite réparti en groupes d'hybridation de 20 x 20 arbres, qu'on soumettra à des croisements diallèles partiels et polycross afin de préparer les générations ultérieures. On espère que les vergers à graines de première génération produiront au moins 4 millions de semences pour les bonnes années de production situées entre 2 005 et 2 010. On envisage au minimum un gain génétique de 10 p. 100 pour le taux de croissance, un gain supérieur pour la rectitude des tiges et vraisemblablement un gain de 5 p. 100 pour la taille et l'angle des branches. Toutefois, les plantations de mélèze du Japon annoncent des résultats prometteurs, soit une amélioration de 20 p. 100 à la fois du taux de croissance et de la rectitude des tiges par rapport au mélèze laricin indigène, du moins en ce qui concerne les principales terres forestières de l'île (Charles M. Harrison, comm. pers.).

Nord des États-Unis

Au niveau des régions nordiques des É.-U., les programmes d'amélioration génétique du mélèze sont réalisés par des coopératives. La coopérative «U.S Forest Service/Inland Empire Tree Improvement Cooperative» réalise un programme d'hybridation du mélèze de l'Ouest, en suivant une stratégie basée sur la sélection d'arbres-plus, sur des vergers à graines clonales et sur la sélection récurrente à partir des résultats des tests de descendances uniparentales.

La coopérative «University of Minnesota/Institute of Paper Science and Technology, Aspen/Larch Genetics Cooperative» exploite un programme d'hybridation du mélèze d'Europe, du Japon et hybride uniquement parce que ces espèces déclassent le mélèze laricin sur les sites mésiques du centre nord et du nord-est des É.-U. et du

Canada (Wyckoff *et al.*, 1992). Cette stratégie est basée sur la sélection récurrente en fonction de l'aptitude générale à la combinaison, dans le but d'améliorer les mélèzes d'Europe et du Japon. L'objectif consiste à améliorer la capacité d'adaptation et le taux de croissance des deux espèces au niveau des plantations commerciales. Les arbres sélectionnés de mélèze d'Europe seront répartis en groupes d'amélioration en fonction de l'origine des sources de semences, de manière à assurer le maintien de la diversité génétique et à éviter la consanguinité au niveau des générations futures. Étant donné les restrictions budgétaires et considérant la distribution naturelle restreinte et la faible variation qui caractérisent le mélèze du Japon, une population unique sera utilisée pour le programme d'amélioration récurrente (Wyckoff *et al.*, 1992).

En ce qui concerne l'amélioration génétique du mélèze hybride, une population hybride unique composée de 160 familles biparentales obtenues de croisements par paires uniques servira comme population d'hybridation de base pour l'amélioration future selon une méthode de sélection récurrente. «Les générations subséquentes d'hybrides seront sélectionnées par croisements de la population hybride de base et aucune hybridation ultérieure entre les deux espèces ne sera pas réalisée au niveau des générations futures» (Wyckoff *et al.*, 1992). Cette stratégie d'hybridation est basée sur l'information de programmes d'amélioration génétique des hybrides entre le pin loblolly (*Pinus taeda* L.) et le pin rigide (*Pinus rigida* Mill.) et de programmes d'amélioration génétique du maïs. Entre-temps, sur la base des résultats des tests sur le terrain, les semences des meilleures familles biparentales seront produites à des fins de plantation commerciale par croisements contrôlés, dans des vergers à graines ou des parcs de croisements à l'aide de pollinisation de masse. Wyckoff *et al.* (1992) n'excluent pas la propagation végétative d'arbres hybrides supérieurs au niveau des générations subséquentes, de manière à tirer profit de tous les gains génétiques qui découlent

du programme de production d'hybrides et pour produire des plantations d'hybrides uniformes.

Discussion et Conclusion

Cette brève revue montre que de nombreux programmes d'amélioration génétique des mélèzes ont été lancés au Canada et aux U.S.A. Le mélèze de l'Ouest et le mélèze laricin sont les espèces indigènes sur lesquels portent les programmes d'amélioration. En ce qui concerne les espèces exotiques, les mélèzes du Japonais et d'Europe ainsi que leurs hybrides sont les principales essences aux-quelles sont consacrés les travaux d'amélioration génétique, suivies par le mélèze de Sibérie dans les provinces des Prairies.

De manière surprenante, en dépit des programmes d'amélioration génétique existants, la consommation de bois de mélèze et le reboisement avec cette espèce sont généralement très limités si on les compare à l'épinette et au pin. La faible consommation de bois de mélèze peut être expliquée par la rareté des peuplements naturels dans la plupart des provinces. Toutefois, compte tenu du potentiel de production de bois des plantations de mélèze et des multiples utilisations possibles de ce bois, l'absence de programmes importants de reforestation avec du mélèze, comme cela fut le cas avec les pins du Sud dans le sud-est des États-Unis, semble injustifiée..

Compte tenu de leur croissance et production sur des rotations courtes (de 20 à 30 ans), les mélèzes sont les «pins du Sud» des régions nordiques. La reforestation en mélèze et d'autres essences à croissance rapide comme le peuplier offre la possibilité de créer, sur de courtes périodes, de nouvelles ressources de bois sur les terrains agricoles abandonnés et, parallèlement, de créer des emplois en régions rurales, où la situation économique est très inquiétante.

Un autre élément est également surprenant : pour quoi mettre sur pied des programmes d'amélioration du mélèze laricin, lorsqu'on sait

pertinemment que les mélèzes d'Europe et du Japon ainsi que leurs hybrides sont beaucoup plus productifs (Loo-Dinkins *et al.*, 1992; Boyle *et al.*, 1989)? Dans les provinces des Maritimes, dans le sud du Québec et de l'Ontario, les hybrides peuvent produire de deux à trois fois plus de bois que le mélèze laricin sur une diversité de sites variant de sols mésiques aux sols relativement secs.

De plus, Pâques (1992) signalait le potentiel de l'hybride *L. laricina* x (*L. decidua* x *L. kaempferi*) : au bout de 8 ans, sa hauteur est de 19 p. 100 supérieure à celle du mélèze laricin et de 12 p. 100 inférieure à celle de l'hybride *eurolapis*. En dehors de sa vigueur exceptionnelle, cet hybride triple est l'un des meilleurs en ce qui concerne la capacité d'enracinement.

Il est possible qu'à T.-N., et dans les régions nordiques du Québec, de l'Ontario et des Prairies on puisse implanter ce type d'hybride qui serait caractérisé par une bonne résistance au gel et par son rendement plus élevé que le mélèze laricin. Pour obtenir la même production avec du mélèze laricin, il sera probablement nécessaire de consacrer plus d'une génération à l'amélioration. D'autres hybrides pourraient s'avérer prometteurs; il s'agit d'hybrides entre le mélèze de Sibérie et des génotypes de mélèzes d'Europe et du Japon qui affichent un bon degré de résistance au gel et un rendement élevé dans le cadre de certains tests réalisés en forêt boréale. Les provenances de mélèze d'Europe provenant de hautes altitudes dans les Alpes seraient également susceptibles de mieux s'adapter aux conditions écologiques boréales. Si l'on tient compte du potentiel de l'hybride *eurolapis*, il sera nécessaire d'augmenter l'échantillonnage des populations alpines du mélèze d'Europe.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier sincèrement Nicole Durand qui a dactylographié ce rapport, Michel Villeneuve qui l'a révisé et les coopérants

qui ont répondu au questionnaire qui leur a été envoyé :

G. Adams, J.D. Irving Ltd. ;
N. Dhir, Alberta Forest Service ;
Y. El-Kassaby, Produits Forestiers Canadien
Pacifique Ltée ;
B. Elliot, Ministère des Ressources naturelles de
l'Ontario
L. Farintosh, Ministère des Ressources
naturelles de l'Ontario ;
W. Glen, Ministère de l'Énergie et des forêts de
l'Île-du-Prince-Édouard
J. Gonzalez, Forintek Canada Corp. ;
C. Harrison, Ministère des Forêts et de
l'agriculture de Terre-Neuve
B. Jaquish, British Columbia Ministry of Forests
R. Kinghorn, Crestbrook Forest Industries Ltd. ;
J. Klein, Ressources naturelles Canada, Edmon-
ton (Alberta)
R. LeBlanc, Fraser Inc. ;
T. Matheson, Scott Worldwide, Inc. ;
W. Meades, Ressources naturelles Canada,
St. John (T.-N.)
K. Morgenstern, University of New Brunswick ;
P. Neily, Ministère des Ressources naturelles de
la Nouvelle-Écosse
B. Nicks, E.B. Eddy Forest Products Ltd. ;
C. Nielson, Ministère des Ressources naturelles
de l'Ontario
T. Nieman, Institut forestier national de
Petawawa ;
P. Nitschke, Office d'amélioration des arbres de
l'Ontario ;
W. Schroeder, P.F.R.A. Shelterbelt Center ;
D. Simpson, Ressources naturelles Canada,
Fredericton (N.-B.)
K. Tosh, Ministère des Ressources naturelles et
de l'Énergie du Nouveau-Brunswick

Références bibliographiques

- Source anonyme. 1989. The potential for larch in
Nova Scotia. A literature review. Ministère des
Terres et des Forêts de Nouvelle-Écosse.
Rapport d'études forestières.
- Source anonyme. 1992a. Ecology and manage-
ment of *Larix* forests: A look ahead. University
of Montana. Program and abstract booklet.
- Source anonyme. 1992b. Results and future
trends in larch breeding on the basis of pro-
venance research. Délibérations IUFRO Cen-
tennial Meeting. IUFRO Workg. Party
S2.02-07, Berlin, 5-12 septembre 1992. Ed.
by H. Weisgerber, Hessia For. Res. Centre,
Hann. Münden, Allemagne, 1992.
- Boyle, T.J.B., T.C. Nieman, S. Magnussen et J.
Veen. 1989. Species, provenance, and Prog-
eny tests of the genus *Larix* by the Petawawa
National Forestry Institute. Inst. for. nat.
Petawawa, Rap. Inf. For. Can. PI-X-94.
- Carswell, C.L. et E.K. Morgenstern. 1992. Phenol-
ogy and growth of larch species and hybrids
in New Brunswick, Canada. *In* Ecology and
management of *Larix* forest: A look ahead.
Program and abstract booklet. University of
Montana.
- Fowler, D.P. 1986(a). Strategies for the genetic
improvement of important tree species in the
Maritimes. Ressources naturelles Canada,
Rapp. d'information M-X-156.
- Fowler, D.P. 1986(b). Strategy for genetic im-
provement of *Larix* species and hybrids in the
Maritimes. *In* 1986 Larch Workshop. Le
Comité consultatif de recherche forestière du
Nouveau-Brunswick: 73-79.
- Fowler, D.P., J.D. Simpson, Y.S. Park et M.H.
Schneider. 1988. Yield and wood properties
of 25-year-old Japanese larch of different pro-
venances in Eastern Canada. *For Chron.*
décembre 1988: 475-479.
- Harrison, C. 1986. A tree improvement strategy for
the province of Newfoundland and Labrador.
Ministère des Forêts et de l'Agriculture,

- Gouvernement de Terre-Neuve et du Labrador.
- Lamontagne, Y. 1992. Vergers à graines de première génération et tests de descendance implantés au Québec pour les espèces résineuses. Bilan des réalisations. Mémoire de recherche forestière n° 106. Gouvernement du Québec. Ministère des Forêts. Direction de la recherche.
- Loo-Dinkins, J.A., D.P. Fowler, Y.S. Park et E.K. Morgenstern. 1992. Performance of *Larix leptolepis*, *L. decidua*, *L. laricina* and hybrids in the Maritimes region of Canada. Results and future trends in larch breeding on the basis of provenance research. Délib. IUFRO centennial Meeting. Groupe de travail IUFRO Berlin Party S2.02-07, 5-12 septembre 1992. Publié par H. Weisgerber, Hessian For. Res. Centre, Hann. Münden, Allemagne, 1992, p. 169-170.
- Morgenstern, E.K. 1986. Genetic variability and potential for gain. In 1986 Larch Workshop. Le Comité consultatif de la recherche forestière du Nouveau-Brunswick, p. 65-72.
- Morgenstern, E.K. 1987. Method of rooting of larch cuttings and application in clonal selection. For Chron. juin 1987: 174-178.
- Morgenstern, E.K., J.M. Nicholson et Y.S. Park. 1984. Clonal selection in *Larix laricina*. I. Effects of age, clone and season on rooting of cuttings. Silvae Genet. 33: 155-160.
- Pâques, L.E. 1992. Performance of vegetatively propagated *Larix decidua*, *L. kaempferi* and *L. laricina* hybrids. Ann. Sci. For. 49: 63-74.
- Park, Y.S. et D.P. Fowler. 1987. Genetic variances among clonally propagated populations of Tamarack and the implications for clonal forestry. Can. J. For. Res. 17: 1175-1180.
- Schroeder, W.R. 1987. Genetic improvement of Siberian larch for prairie shelterbelts. In Proceedings 5th North Central Tree Improvement Conference p. 150-155.
- Vallée, G. et A. Stipanovic. 1983. Growth and performance of larch plantations. In Proceedings of the Larch Symposium. Ministère des ressources naturelles de l'Ontario, p. 47-63.
- Wyckoff, G.W., Li, B., et E. Humenberger. 1992. Report Three. A progress report to cooperative members. University of Minnesota. Dept. of For. Res. North Cen. Exp. Stat.
- Ying, L. et E.K. Morgenstern. 1990. Inheritance and linkage relationships of some isozymes of *Larix laricina* in New Brunswick, Canada. Silvae Genet. 39: 245-251.
- Ying, L. et E.K. Morgenstern. 1991. The population structure of *Larix laricina* in New Brunswick, Canada. Silvae Genet. 40:180-184.

STRATÉGIE ACTUALISÉE D'AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE DE L'ÉPINETTE NOIRE (*PICEA MARIANA* (MILL.) B.S.P.) AU NOUVEAU-BRUNSWICK

Yill Sung Park, J. Dale Simpson

Ressources naturelles Canada, C.P. 4000, Fredericton, N.-B. E3B 5P7

Gregory W. Adams

J.D. Irving, Limited, Sussex Tree Nursery, Sussex, N.-B. E0E 1P0

E. Kristian Morgenstern

University of New Brunswick, Bag 44555, Fredericton, N.-B. E2B 5C2

Timothy J. Mullin

Forest Science Consultant, C.P. 1321, Truro, N.-É. B2N 5N2

Résumé

Afin de remplacer les techniques d'amélioration génétique conventionnelles des vergers producteurs de graines actuellement en vigueur, des stratégies basées sur une hybridation contrôlée suivie de méthodes de multiplication végétative sont proposées pour mettre en oeuvre la première série de sélections d'épinette noire de seconde génération. Les 80 souches parentes ont été réparties en quatre lignes secondaires de 20 arbres, l'une de ces lignes étant une ligne secondaire d'élite composée des 20 meilleurs parents. L'un des objectifs du recours à une ligne secondaire élite consiste à utiliser les meilleurs parents sur une base intensive pour la population de production. On suit un modèle de test et d'hybridation à deux niveaux, ce qui inclut le recours à une ligne secondaire élite et à des lignes secondaires conventionnelles. Au sein de la ligne secondaire élite, un croisement diallèle non-apparenté sert à produire la descendance qui servira aux tests génétiques, ce qui inclut des tests accélérés avec réplique clonale réalisés en serre. En ce qui concerne les lignes secondaires conventionnelles, un accouplement assortatif est réalisé au sein de chaque ligne secondaire, de manière à produire du matériel pour la troisième génération. Des tests de descendance conventionnels, qui incluent les familles provenant des lignes secondaires élites, seront réalisés et, par la suite, convertis en plantations de choix en vue de la sélection de la troisième génération.

Introduction

L'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) est l'une des essences les plus répandues au Canada; son aire de répartition géographique s'étend de T.-N. au Territoire du Yukon. Il s'agit d'une essence importante sur le plan commercial pour le secteur des pâtes et papiers, en raison de sa bonne densité ligneuse et des caractéristiques de ses fibres. L'intensification de l'utilisation des ressources forestières a mené à l'élaboration de programmes de reforestation à grande échelle dans de nombreuses régions du Canada. À l'est du Manitoba, il s'agit de l'essence la plus fréquemment plantée (Smyth et Brownright,

1986). Dans la veine de ces programmes de reforestation, des activités de sélection et d'amélioration génétique ont démarré dans certaines provinces dès 1960. Depuis l'année 1975, des programmes d'amélioration génétique des arbres de grande envergure ont débuté dans toutes les provinces où ces essences sont importantes. L'épinette noire est la principale essence utilisée pour les programmes d'amélioration des arbres dans les Maritimes (Coles, 1979).

La mise au point de stratégies d'hybridation efficaces passe par l'obtention de données génétiques détaillées. Au moment du lancement de ces pro-

grammes d'amélioration, toutefois, on ne possédait pas en général une telle information. L'élaboration initiale des stratégies d'hybridation de l'épinette noire fut basée sur les expériences relatives à d'autres essences et sur les données disponibles sur le moment relativement aux caractères biologiques et génétiques; toutefois, on admettait la nécessité de faire preuve de souplesse afin d'intégrer les progrès technologiques et les données nouvelles (Fowler, 1986, 1987). Au cours des 15 dernières années, depuis le lancement des programmes d'amélioration génétique de l'épinette noire, de l'information génétique plus détaillée a été diffusée et nombre de progrès techniques ont été réalisés, soit par exemple la multiplication végétative des semis juvéniles par boutures racinaires, les techniques de tests et d'hybridation accélérés et la propagation par embryogenèse somatique et cryopréservation.

Les objectifs de ce document consistent : 1) à évaluer l'avancement du programme d'amélioration génétique de l'épinette noire au N.-B. et 2) à proposer un plan d'hybridation actualisé pour les générations avancées en utilisant les données et les techniques génétiques les plus récentes.

Stratégies d'hybridation pour la première génération

La stratégie d'hybridation adoptée au niveau de la première génération était une stratégie de vergers producteurs de graines de semis, selon laquelle les sélections d'arbres plus étaient effectuées à partir des peuplements naturels sur la base des phénotypes individuels; suivaient l'implantation de vergers à graines de semis et la réalisation de tests de familles en utilisant les semences en pollinisation libre des arbres sélectionnés. Cette stratégie est généralement plus simple et moins coûteuse que la stratégie de «vergers producteurs de graines clonales» pratiquée pour de nombreuses essences dans le monde entier. La floraison précoce de l'épinette noire, qui peut se

produire dès l'âge de 6 ans, (Morgenstern et Fowler, 1969) fut également un motif important d'adoption de cette stratégie (Morgenstern et Park, 1991).

Une stratégie détaillée d'hybridation de l'épinette noire a été mise au point par le Conseil d'amélioration des arbres du N.-B. (CAANB) (Fowler, 1986); toutefois, certaines modifications seront peut-être nécessaires au bout de la première génération. Au total, 1 200 arbres plus ont été sélectionnés sur une période de 10 ans afin d'établir les tests de familles en pollinisation libre (Simpson, 1992). Vu que les arbres ont généralement une tige rectiligne, une couronne étroite et des branches courtes, les efforts de sélection ont été axés sur le critère de la croissance verticale (Coles, 1979). À ce jour, un total de 85 hectares de vergers producteurs de graines et 63 tests de famille ont été établis. Les vergers producteurs de graines de semis ont été plantés en utilisant des parcelles de descendance en pollinisation peu espacées (1 x 2 mètres); de plus, chaque famille était représentée par environ 100 arbres répartis de manière aléatoire dans les vergers. Les tests de famille étaient généralement réalisés à cinq emplacements en utilisant 10 blocs aléatoires de lignes parcelles de quatre arbres pour chaque emplacement. Ces tests de famille répondent à deux objectifs : 1) classer les familles en fonction de leur rendement à fin d'épurer les vergers producteurs de graines de semis et 2) sélectionner les 400 meilleurs arbres pour l'hybridation de seconde génération.

Hybridation de générations avancées

En 1990, le CAANB a lancé le second programme d'amélioration de seconde génération de l'épinette noire, en suivant la stratégie préconisée par Fowler (1986); on utilise d'abord les meilleurs arbres de chacune des 400 meilleures familles (c.-à-d. 400 clones). De plus, ces 400 clones sont soumis à des tests polycross afin de déterminer leur aptitude générale à la combinaison (AGC). Parallèlement, ces 400 clones font l'objet de

croisements à paire unique afin de produire 200 familles biparentales à partir desquelles seront sélectionnés les 400 meilleurs arbres (quatre meilleurs arbres de chaque famille) et ce, de manière à constituer 20 lignes secondaires de 20 arbres pour l'hybridation de troisième génération. Par la suite, pour chaque génération, l'accouplement polycross sert à déterminer les valeurs AGC des clones, et un système d'accouplement diallèle partiel est utilisé pour produire la population d'hybridation de la génération suivante. Pour chaque génération, de nouveaux vergers producteurs de graines clonales sont établis, puis ils sont éclaircis par la suite sur la base de tests polycross.

Étant donné que la sélection des arbres plus a été réalisée sur une période de 10 ans, la stratégie a été mise en oeuvre par étapes avec chevauchement des générations. Dès 1993, les quatre premiers d'une série de tests de famille ont été évalués sur la base du rendement au bout de 10 ans. En tenant compte des résultats des tests de famille, les vergers producteurs de graines de semis correspondants ont été épurés, et au total 176 arbres ont été sélectionnés au sein des parcelles de famille, à des fins d'hybridation de seconde génération. Les 400 meilleurs clones de la série la plus ancienne de tests de famille servent actuellement à établir les vergers producteurs de graines clonales.

Options de stratégies d'hybridation basées sur la propagation clonale

À titre d'option de remplacement des méthodes d'hybridation des vergers producteurs de graines conventionnelles actuellement en vigueur, on réalise à l'heure actuelle la mise en oeuvre sur une base expérimentale de procédures d'hybridation-clonage afin de produire du matériel amélioré pour la reforestation. Même si l'hybridation conventionnelle des vergers producteurs de graines devrait se poursuivre afin de répondre à une proportion importante des besoins en matière de reforestation, la stratégie devrait selon toute

vraisemblance permettre de réaliser des gains encore plus importants, en utilisant la technologie du clonage et en mettant à profit les récents progrès technologiques, ce qui inclut l'induction florale, la bouture racinaire améliorée, l'embryogenèse somatique et la cryopréservation.

Au cours des prochaines années, on prévoit que la multiplication végétative basée sur la bouture racinaire de plants juvéniles et l'embryogenèse somatique constituent une option viable pour la production massale de matériel de reproduction de la plupart des conifères nordiques (Park et Bonga, 1993; Park *et al.*, 1993). À l'heure actuelle, en ce qui concerne l'épinette noire et l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss), une propagation végétative à grande échelle est possible en utilisant les boutures de semis donateurs juvéniles même si cette formule coûte 1,5 fois plus cher que le matériel de semis équivalent (White, 1992; ministère des Ressources naturelles de N.-É., comm. pers.).

La stratégie alternative d'hybridation proposée pour l'épinette noire, et vraisemblablement pour l'épinette blanche également, consiste à incorporer la propagation végétative pour produire du matériel de reproduction. Dans le cadre d'une étude consacrée aux facteurs sur lesquels il convient de baser la sélection des semis et des options clonales à des fins d'hybridation et de forestation au N.-B., Mullin (1992) révélait que la multiplication végétative des graines produites dans des vergers en pollinisation contrôlée pourrait constituer une méthode viable sur le plan économique, même si les taux d'intérêts sont élevés.

Les grandes lignes de la stratégie d'hybridation alternative proposée ainsi que les gains génétiques possibles en théorie, ont été décrits par Mullin et Park (1992). Le présent document présente toutefois la description des détails opérationnels de la stratégie en vue d'une mise en oeuvre éventuelle au N.-B.

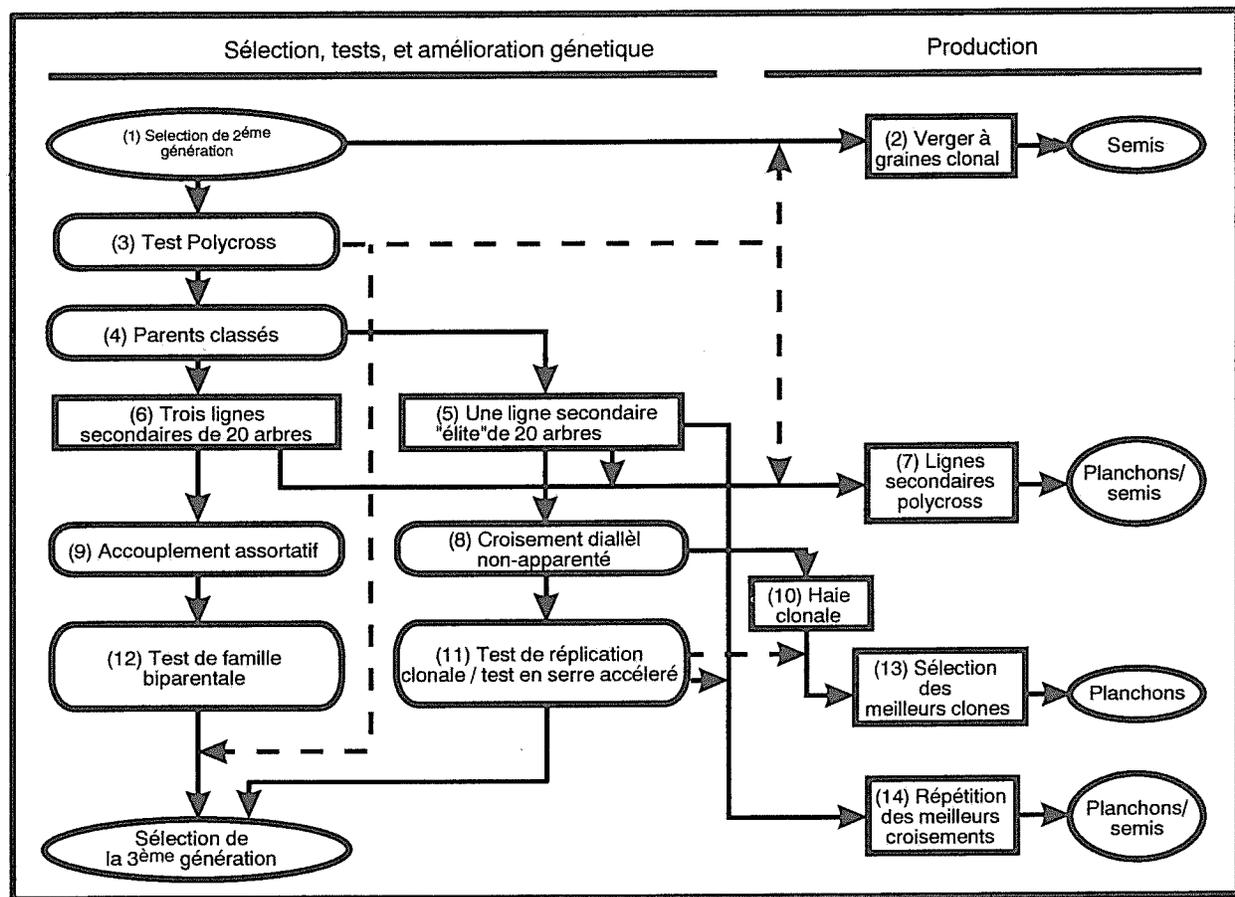


Figure 1 Graphique du programme d'amélioration de deuxième génération de l'épinette noire dans le Nouveau-Brunswick. Lignes solides représentent le flux de matériaux; lignes en pointillé représentent le flux d'information.

Grandes lignes

Le graphique de la stratégie alternative d'amélioration génétique relative au premier ensemble de sélections de deuxième génération est illustré sur la Figure 1. Au niveau de ce premier ensemble, 80 clones sélectionnés à partir des tests de famille (les meilleurs arbres de chacune des 80 meilleures familles) sont utilisés. De plus, dans le cadre du plan CAANB, les vergers producteurs de graines clonales conventionnels ont été établis au moyen des 40 meilleurs clones (2). La totalité des 80 sélections font l'objet de tests polycross selon une formule type et des tests de descendance sont réalisés (3). Sur la base des résultats des tests polycross en pépinière, les

parents sont classés (4). L'information sert ensuite à constituer 20 lignes secondaires de 20 arbres et éventuellement à réaliser une épuration de faible intensité au niveau du verger producteur de graines clonales. L'une des quatre lignes secondaires est composée des 20 meilleurs parents AGC; il s'agit de la ligne secondaire «élite» (5) décrite par Williams et Lambeth (1992). Au niveau des trois autres lignes secondaires, les parents classés sont répartis uniformément entre les lignes secondaires (6). Les polycroisements contrôlés provenant de la ligne secondaire élite ainsi que les 5 à 10 meilleurs arbres de chacune des autres lignes secondaires font l'objet d'accouplements polycross entre les différentes lignes secondaires et (7) les semences produites

sont récoltées en vrac, cultivées en semis avant de faire l'objet d'une propagation végétative au moyen d'enracinement sériel des boutures à des fins de reforestation. Un croisement diallèle non-apparenté est réalisé sur la ligne secondaire élite dans un hall d'hybridation, de manière à produire 30 familles biparentales (8). La répartition des parents en vue de l'accouplement se fait sur une base aléatoire au sein de la ligne secondaire élite. En ce qui concerne les autres lignes secondaires d'arbres, un modèle d'accouplement assortatif est réalisé sur la base du classement AGC des arbres. La descendance de l'accouplement diallèle non-apparenté (30 familles biparentales provenant de la ligne secondaire élite) est élevée dans une serre, afin de réaliser un test de descendance. De plus, les 10 semis les plus hauts de chacune des familles font l'objet d'une réplique clonale. Les donneurs des semis (ortets) sont gérés par taille de rajeunissement (10) et les répliques clonales sont utilisées pour les tests de descendance (11). Le test de descendance inclut un test accéléré en serre (Sulzer *et al.*, 1993) ainsi qu'un test de descendance biparental conventionnel, qui sera utilisé pour la sélection ultérieure. La descendance qui découle des autres lignes secondaires d'arbres sert à établir les tests de famille (12) à partir desquels les sélections ultérieures de la troisième génération seront réalisées. Au fur et à mesure où les résultats des diverses étapes du test de descendance sont disponibles, l'information est utilisée pour modifier le modèle de test polycross (7) qui sert à produire les plançons. Lorsque le test de descendance identifie des familles biparentales supérieures, les croisements peuvent être répétés dans le hall d'hybridation (14) et les semis produits peuvent être multipliés végétativement en utilisant un enracinement sériel des boutures. Une autre formule peut consister à effectuer la multiplication végétative des meilleurs clones de la ligne secondaire élite (13) en utilisant les ortets des haies clonales, au fur et à mesure où progresse le test de l'application clonale (10). Sur la base des résultats des tests de famille et des tests de descendance, les 20 meilleurs clones de chaque

ligne secondaire, soit un total de 80 clones, sont sélectionnés pour la population génétique de troisième génération.

Test polycross

Les tests polycross (Fig 1,(3)) servent à évaluer l'indice AGC des sélections de seconde génération. Un mélange pollinique composé de volumes équivalents de pollens provenant de 20 arbres non-apparentés est utilisé. Ce mélange exclut le pollen des parents qui font l'objet du test et le même pollen sert à tester tous les parents. Le mélange est conservé en vue de tests ultérieurs, comme le recommande Fowler (1986).

Des tests de descendance polycross sont établis sur le terrain à six emplacements distincts; 15 rectangles de parcelles de 2 arbres sont constitués, ce qui inclut un test de multiplication. Les parcelles expérimentales sur le terrain sont évaluées à intervalles de 5 ans et les résultats seront utilisés pour épurer les vergers à graines clonales conventionnels. Le test de multiplication sera réalisé sur trois ans et les parents seront classés en fonction des résultats du test de multiplication afin de former les lignes secondaires subséquentes. On pourra également choisir de réaliser un test de descendance accéléré en serre, de manière à raccourcir le processus d'environ une année. À l'heure actuelle, la première série de tests de multiplication est presque terminée et les sélections de seconde génération seront bientôt classées.

Lignes secondaires

Toutes les sélections de seconde génération seront réparties en lignes secondaires comme le suggèrent Van Buijtenen et Lowe (1979), en affectant 20 arbres à chaque ligne secondaire. Pour cette répartition, on se base sur le classement AGC relatif à la hauteur précisée dans le cadre du test en pépinière. La première ligne secondaire est constituée en affectant les 20 meilleurs arbres à la constitution d'une ligne

Tableau 1. Composition de lignes secondaires représentée par le classement des clones sur la base des résultats des tests polycross.

Ligne secondaire 1 : (Ligne 2 ^{aire} élite)	1, 11,	2, 12,	3, 13,	4, 14,	5, 15,	6, 16,	7, 17,	8, 18,	9, 19,	10 20
Ligne secondaire 2	21, 51,	26, 56,	27, 57,	32, 62,	33, 63,	38, 68,	39, 69,	44, 74,	45, 75,	50 80
Ligne secondaire 3	22, 52,	25, 55,	28, 58,	31, 61,	34, 64,	37, 67,	40, 70,	43, 73,	46, 76,	49 79
Ligne secondaire 4	23, 53,	24, 54,	29, 59,	30, 60,	35, 65,	36, 66,	41, 71,	42, 72,	47, 77,	48 78

secondaire élite. Le principal motif de l'élaboration de cette ligne secondaire élite consiste à utiliser les meilleurs parents sur une base intensive pour produire le matériel de reproduction. En ce qui concerne les autres lignes secondaires d'arbres, les arbres sont distribués de manière uniforme (Tableau 1). Toutefois, dans l'avenir, les lignes secondaires seront également susceptibles d'être constituées en fonction de certains critères précis, du type résistance au gel ou degré d'adaptation à certaines zones de plantation précises. La gestion de populations d'hybridation multigénération au moyen de lignes secondaires permet une certaine flexibilité tout en assurant l'obtention de gains génétiques progressifs. La consanguinité est une conséquence inévitable de tout programme d'hybridation multigénération. Le recours aux lignes secondaires facilite le contrôle de la coascendance en limitant l'autofertilisation à chaque ligne secondaire. Cette consanguinité est éliminée au niveau de la population de production par croisements entre les différentes lignes secondaires. Il est également possible de mettre au point des lignes secondaires à forte consanguinité de manière à utiliser l'autofécondation comme outil d'hybridation, comme le suggèrent Lindgren et Gregorius (1977).

Stratégies d'hybridation-clonage

La stratégie d'hybridation alternative proposée dans ce document est axée sur l'hybridation contrôlée à laquelle succède une multiplication végétative, stratégie baptisée «hybridation-clonage». Le potentiel de gains génétiques que permettent l'hybridation et le déploiement des clones devrait être supérieur aux gains possibles selon les techniques conventionnelles d'hybridation des vergers producteurs de graines et de plantation de semis. À titre d'exemple, une augmentation du gain génétique de l'épinette noire a été possible en mettant à profit une plus forte proportion de la variance additive ainsi qu'une partie importante de la variance non additive (variance épistatique) (Mullin *et al.* 1992). Si les avantages de la reforestation clonale ont été admis (Carson, 1986; Libby et Rauter, 1984; Libby, 1990), la mise en oeuvre de programmes de forestation clonale est limitée par plusieurs facteurs. Le principal facteur correspond vraisemblablement à notre incapacité de propager des répliques authentiques selon un rythme de production acceptable, à cause du vieillissement des plants donateurs. Une telle restriction ne peut être que partiellement compensée par voie de propagation sérielle des jeunes semis rajeunis de moins de 5 ans (Dekker-

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
A		X	X	X																
B				X	X															
C					X															
D																				
E						X	X	X												
F							X	X												
G								X												
H																				
I									X	X	X									
J										X	X									
K											X									
L																				
M													X	X	X					
N														X	X					
O															X					
P																				
Q																	X	X	X	
R																		X	X	
S																				X
T																				

Figure 2. Le modèle d'accouplement diallèle non-apparenté constitue la ligne secondaire élite de manière à produire la descendance à des fins de sélection et de tests. Les parents sont répartis de manière aléatoire au sein de la ligne secondaire.

Robertson et Kleinschmit, 1991). À l'heure actuelle, une propagation opérationnelle des répliques authentiques de l'épinette noire est possible en utilisant des semis très jeunes par voie d'enracinement des boutures.

La production opérationnelle de matériel de reproduction d'épinette noire clonale en utilisant une bouture racinaire a été réalisée à une échelle limitée en Ontario (Rogers, 1990), au Québec (Beaudoin *et al.*, 1991) et en N.-É. (Levy, 1983). Pour ce qui est de la mise en oeuvre de la stratégie de reforestation clonale au N.-B., nous envisageons trois options possibles en matière de

stratégie d'hybridation-clonage, selon la description de Mullin et Park (1992), c.-à-d. 1) sélection AGC en amont et accouplement polycross 2) sélection en amont selon l'aptitude spécifique à la combinaison (SCA) et répétition des croisements et 3) sélection clonale en aval.

Modèles d'accouplement

En ce qui concerne la ligne secondaire élite, un modèle d'accouplement diallèle non-apparenté servira à produire une population de descendants aux fins de sélection et de tests de descendance pour la troisième génération. Au sein de la ligne

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1		X	X																	
2			X																	
3				X																
4					X	X														
5						X	X													
6								X												
7																				
8	X	X																		
9									X											
10										X										
11											X									
12												X								
13													X							
14														X						
15															X					
16									X											
17	X																			
18			X																	
19				X																
20							X													

Figure 3. Modèle d'accouplement assortatif au sein d'une ligne secondaire pour les tests de descendance biparentale et la sélection. Les numéros des parents correspondent à leur classement AGC.

secondaire, cinq séries de demi-diallèles quadriparentales seront utilisées de manière à produire 30 familles biparentales (Figure 2). Les parents sont répartis de manière aléatoire entre les séries diallèles et au sein de chacune de ces séries. Le recours à des séries non-apparentées au sein d'une ligne secondaire peut être considéré comme une forme de «ligne secondaire au sein d'une ligne secondaire», formule susceptible de s'avérer utile pour gérer les lignes secondaires et sélectionner la population d'hybridation de la génération suivante. Vu que le modèle d'accouplement est équilibré, on prévoit que les tests de descendance fourniront des estimations

fiables des indices d'AGC et d'ACS. De plus, la descendance provenant d'une ligne secondaire élite servira à alimenter en matériel la sélection clonale et le déploiement dans le cadre des programmes de reforestation.

En ce qui concerne les trois autres lignes secondaires, un modèle d'accouplement assortatif sera utilisé.

Au sein de chaque ligne secondaire, les parents seront placés selon leur classement AGC et un accouplement contrôlé sera réalisé. En ce qui concerne les huit parents qui se classent le mieux,

trois croisements par parent seront effectués sur ces huit arbres et deux croisements par parent seront réalisés sur les huit parents qui se classent au milieu de l'échelle. En ce qui concerne les huit parents classés au bas de l'échelle, on effectuera un accouplement par paire avec l'un des huit parents qui se classent en haut de l'échelle. La figure 3 illustre un exemple du modèle d'accouplement qui permet la génération de 24 familles biparentales.

Des travaux d'hybridation considérables seront nécessaires pour mettre en oeuvre les modèles d'accouplement diallèles non-apparentés et assortatifs proposés. Pour réaliser les croisements nécessaires dans des délais acceptables, il importe que des techniques d'hybridation accélérée soient utilisées conformément à la description de Greenwood *et al.* (1991).

Tests de descendance

Les tests de descendance constituent une composante essentielle et coûteuse de tout programme d'amélioration génétique des arbres. Ils sont souvent freinés par des problèmes de coût ou de logistique et il convient de réaliser certains compromis. À titre d'exemple, l'augmentation du nombre de génotypes au niveau du test sera susceptible de justifier une réduction du nombre de sites d'expérimentation. De plus, lorsque les plantations expérimentales servent à sélectionner le matériel d'hybridation de la prochaine génération, d'autres compromis seront parfois nécessaires. Trois types de tests de descendance seront réalisés. 1) Test de descendance biparentale réalisé sur les quatre lignes secondaires; 2) test de réplication clonale réalisé sur la ligne secondaire élite et 3) test accéléré en serre ou pépinière réalisé sur la ligne secondaire élite avec répliques clonales.

Le test de descendance biparentale réalisé sur les quatre lignes secondaires sera mis en application en deux ou trois endroits différents du N.-B. Au total, 102 familles seront soumises au test de

descendance. À chaque emplacement du test, 10 blocs de parcelles de quatre arbres seront plantés. Le test sera évalué à intervalles de 5 ans. Après évaluation du test au bout de 10 ans, la sélection de la population d'amélioration génétique de la génération suivante sera réalisée au niveau d'une plantation expérimentale. Il est probable que les emplacements des tests caractérisés par la plus faible variabilité environnementale soient utilisés à fins de sélection. Vu que la sélection des générations suivantes sera réalisée dans les plantations expérimentales, le site du test devra être choisi et préparé soigneusement de manière à réduire la variabilité environnementale.

Qu'il s'agisse de tests accélérés en serre ou de tests de réplication clonale sur le terrain, ces tests seront réalisés sur la ligne secondaire élite. Les semences provenant des familles biparentales obtenues à partir de l'accouplement diallèle non-apparenté seront cultivées en serre et les 10 semis les plus hauts de chacune des 30 familles seront sélectionnés et affectés au clonage; on obtiendra donc au total 300 clones. Ces clones feront l'objet d'une propagation végétative selon la description de Park et Fowler (1987) et Mullin *et al.* (1992). Deux cycles de boutures racinaires sérielles seront parfois nécessaires pour produire un nombre suffisant de répliques clonales (ramettes) pour les tests.

Le test de réplication clonale sur le terrain sera établi à un ou deux emplacements, où on prévoit la mise en oeuvre d'activités opérationnelles de foresterie clonale. Pour chaque emplacement, 10 blocs de parcelles de descendance en pollinisation seront plantés. À l'image du test de descendance en semis, le test sera mesuré à intervalles de 5 ans.

Des tests accélérés en serre, selon la description de Sulzer *et al.* (1993) seront réalisés par voie de répliques clonales. Il a été prouvé que la meilleure corrélation familiale de la hauteur sur le terrain au bout de 10 ans dans les délais les plus courts a été enregistrée dans le cadre des études en pot

réalisés en serre avec contrôle de la saison de croissance. Les semis seront mis en pot après la pousse initiale (6 mois). Au bout d'une période de dormance, les semis seront cultivés durant deux cycles de croissance dans des conditions de «saisons de croissance longues» de manière à promouvoir une croissance libre.

Pour mettre en oeuvre une stratégie de clonage efficace, il conviendra de disposer d'information génétique pertinente. Shaw et Hood (1985) ont étudié les avantages du recours à des répliques clonales pour améliorer la précision du classement des représentants des différentes familles à des fins de sélection; ils ont conclu que les répliques clonales devraient améliorer les gains génétiques cumulatifs obtenus durant chaque cycle d'hybridation. Pour prévoir les gains génétiques découlant des stratégies de clonage, il est nécessaire d'obtenir des variances additives et non-additives, ce qui inclut la variance épistatique. Mullin et Park (1992) ont utilisé des ramettes clonées à partir de croisement biparental, de manière à régler le problème de la variance non additive en raison de son incidence sur l'épistasie et sur la dominance. De toute évidence, l'efficacité de la sélection clonale bénéficierait d'information détaillée sur l'amplitude des variations génétiques de la population clonée, ce qui inclut la ligne secondaire élite.

En complément des tests de réplique clonale décrits précédemment, les ortets originaux et le premier cycle de boutures racinaires (c.-à-d. les ortets correspondants au second cycle de boutures racinaires) seront gérés dans des haies clonales jusqu'à l'obtention des résultats du test clonal. Les 20 meilleurs clones de la haie seront utilisés comme plants donateurs afin de produire des plançons en vue de la reforestation. Les clones de la haie feront l'objet d'une propagation végétative tous les trois ans, de manière à conserver leur juvénilité. Ce processus permet également de comparer les ramettes des différents cycles de propagation de manière à

déterminer l'importance des effets de type C éventuels (Lerner, 1958).

Production de plançons pour la reforestation

La sélection AGC et le croisement polycross en amont sont faciles à réaliser et peuvent débiter peu de temps après l'établissement de lignes secondaires, comme l'indique la Figure 1, (7). Les valeurs reproductives des parents sont déterminées en fonction des résultats d'un test de descendance polycross réalisé auparavant en pépinière. Les 10 meilleurs parents en termes d'AGC de chacune des lignes secondaires sont sélectionnés afin d'être utilisés pour l'accouplement polycross; d'où les termes «sélection AGC en amont et accouplement polycross».

Pour tirer profit de la ligne secondaire élite, les parents sont répartis en deux groupes (de 10 arbres chacun) et font l'objet d'un accouplement polycross contrôlé entre les deux groupes. Également, les polymix de la ligne secondaire élite servent à l'accouplement polycross de parents sélectionnés correspondant aux trois lignes secondaires courantes. De plus, les parents sélectionnés d'une ligne secondaire font l'objet d'un accouplement polycross avec un polymix de parents choisis d'une autre ligne secondaire; un exemple du modèle d'accouplement polycross est illustré sur la Figure 4. Les quantités limitées de semis produites par les accouplements polycross font ensuite l'objet d'une multiplication végétative au moyen de boutures racinaires sérielles de jeunes semis. Cette stratégie équivaut aux vergers producteurs de graines clonales conventionnels avec épuration, en évitant toutefois la plupart des problèmes d'efficacité associés aux vergers producteurs de graines à pollinisation par le vent, comme la contamination du pollen ou la floraison non synchrone. Étant donné que l'étape initiale de cette stratégie est basée sur les résultats d'un test de trois ans en pépinière, le modèle sera susceptible de devoir être révisé au fur et à mesure où sont publiés les résultats de

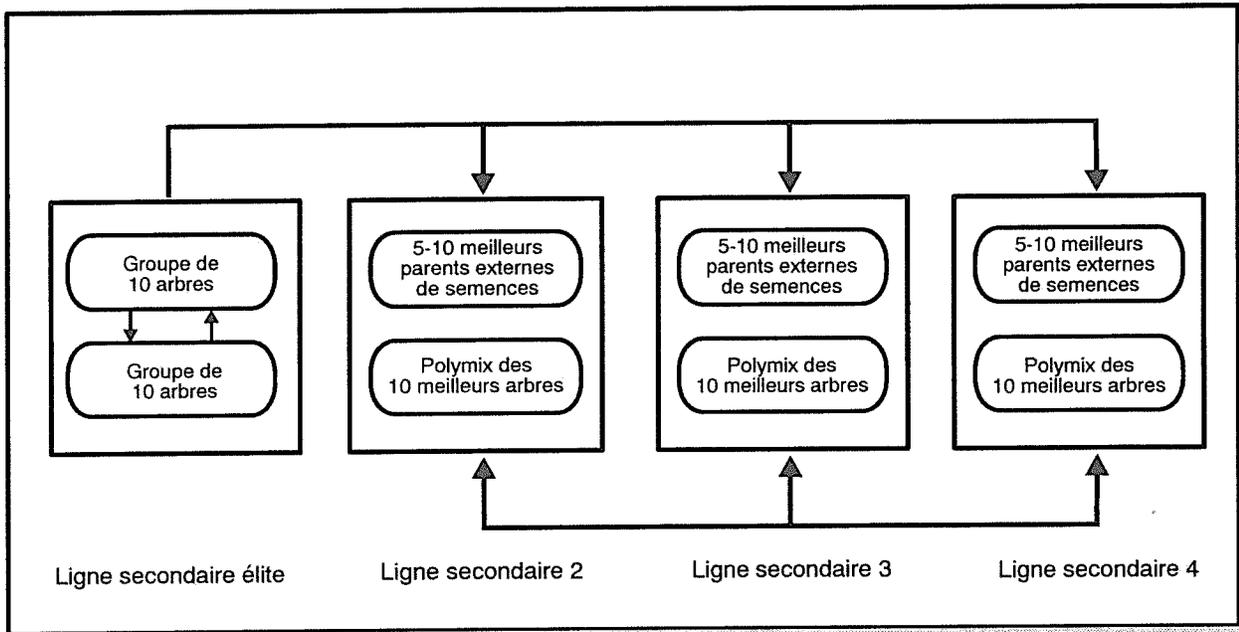


Figure 4. Exemple d'accouplement polycross et de sélection en amont selon l'aptitude générale à la combinaison afin de produire des semences pour la multiplication végétative.

l'évaluation périodique des tests polycross et des tests de descendance sur le terrain, particulièrement lorsque le classement des parents subit des modifications importantes. Aussi, cette stratégie est facilement adaptable à l'évolution des besoins et plus flexible que la stratégie des vergers producteurs de graines basés sur le terrain.

Sur la base des résultats des tests de descendance réalisés sur la ligne secondaire élite, les parents qui ont produit les meilleures paires ACS seront identifiés et les croisements seront répétés; par «croisements répétés et sélections ACS en amont», de manière à produire des semis pour la production de plançons. Les gains génétiques qui découlent de cette stratégie dépendent de l'importance de la variance ACS (c.-à-d. de l'effet dominance) au sein de la ligne secondaire élite. Compte tenu de l'absence de variances ACS, les gains qui découlent de cette stratégie devraient être similaires à ceux de la méthode

d'accouplement polycross et de sélection AGC en amont.

C'est au niveau de la sélection clonale et de la multiplication végétative de clones sélectionnés en amont que seront enregistrés les gains génétiques les plus importants, étant donné qu'une telle stratégie est basée sur la variance génétique totale, ce qui inclut la variance épistatique. Des tests de descendance avec réplication clonale réalisés sur la population élite permettront de préciser les meilleurs clones en vue de la reforestation, et de là d'effectuer une «sélection clonale en amont».

La multiplication végétative de ces clones sera réalisée à partir des haies de clones dont la juvénilité a été maintenue par voie de boutures racinaires sérielles. Cette stratégie est fréquemment baptisée «foresterie clonale» et de nombreuses études démontrent qu'elle génère des gains génétiques élevés en permanence. Le recours à cette stratégie dépend de la comparai-

son entre le rendement des boutures racinaires des haies clonales et le rendement du matériel des semis. Aussi, son succès dépend de l'efficacité de l'interruption de la maturation des plants donateurs durant les tests clonaux ainsi que de la rentabilité économique de la production du matériel des plançons en comparaison du matériel des semis.

Sélection pour la génération suivante

La sélection de la population d'hybridation pour la troisième génération sera réalisée à partir de tests de descendance biparentale. Vingt clones provenant de 24 des 30 familles biparentales, dérivées respectivement des croisements diallèles assortatifs ou non-apparentés des lignes secondaires seront sélectionnés de manière à former une nouvelle ligne secondaire pour la troisième génération. La sélection sera réalisée au moyen d'un indice basé sur le rendement des différents individus, pondéré par les données sur l'AGC parental tirées du test polycross.

Lindgren (1986) proposait un déploiement linéaire des clones sur la base des valeurs AGC pour les vergers producteurs de graines, et l'hybridation, ce qui inclut des modèles d'accouplement, pour obtenir un gain optimal. Comme nous l'avons mentionné précédemment, le modèle d'accouplement utilisé était une combinaison d'accouplements assortatifs. De plus, le modèle d'accouplement diallèle non-apparenté utilisé dans le cadre de cette stratégie possède une structure de ligne secondaire à l'intérieur même d'une ligne secondaire (c.-à-d. diallèle non-apparenté au sein de chaque ligne secondaire). Les différences entre les cinq diallèles non-apparentés seront comparés et, éventuellement, un déploiement linéaire des clones de diallèles différents pourra être réalisé. À titre d'exemple, on sélectionnera plus de clones à partir des meilleures séries diallèles au détriment des séries de qualité inférieure.

Contrôle de la diversité génétique

L'objectif de toute stratégie d'hybridation consiste à convertir efficacement les variations génétiques en gains, ce qui nécessite le maintien de la plus grande diversité génétique possible dans le cadre de la stratégie (Dempfle, 1990). Le concept de la stratégie d'hybridation doit tenir compte du paradoxe qui veut que les méthodes de sélection efficaces en terme de gains ne sont pas efficaces sur le plan de la préservation de la diversité (Wei et Lindgren, 1991). Comme nous l'avons mentionné précédemment, la subdivision de la population d'amélioration génétique en lignes secondaires facilitera le maintien de la diversité à l'échelle de l'ensemble de la population, même si les effets combinés de l'autofertilisation et de la dérive aléatoire sont susceptibles d'entraîner une perte rapide de variabilité au sein des différentes lignes secondaires. La dérive aléatoire provoquera une perte des allèles neutres ou leur fixation à l'intérieur de lignes secondaires réduites, même si la subdivision limite les effets de la dérive sur la population globale. La dérive pourra être efficacement compensée en introduisant à l'occasion de nouvelles sélections non apparentées dans les lignes secondaires (Lacy, 1987).

Si les accouplements polycross effectués entre lignes secondaires seront toujours des croisements non consanguins (en supposant qu'aucune sélection originale n'est apparentée), les croisements effectués entre lignes secondaires justifieront une accumulation de la consanguinité. Cette accumulation sera accélérée par des méthodes du type sélection selon l'indice combiné ou accouplement assortatif positif, méthodes qui sont conçues pour augmenter les gains obtenus. Une sélection de générations futures pourra être affaiblie lorsqu'on permet à l'autofertilisation délétère d'atteindre des niveaux inacceptables. De plus, vu que les clones de ces croisements infra lignes secondaires doivent faire l'objet de tests en vue d'un déploiement éventuel, il importe que la coascendance soit contrôlée de

manière à minimiser les répercussions de la consanguinité sur le rendement des clones. Dans la mesure où des dossiers des souches sélectionnées sont tenus à jour, les techniques informatiques de calcul des coefficients de consanguinité (ex., Meuwissen et Luo; 1992; Tier, 1990) facilitent le calcul des coefficients de consanguinité pour tous les individus de la population d'hybridation et pour tous les croisements possibles. La coascendance peut être contrôlée en limitant le nombre de sélections apparentées effectuées au niveau de chaque génération ou en contrôlant les niveaux de consanguinité des modèles d'accouplement utilisés pour produire la descendance et les clones de sélection. L'efficacité des stratégies de contrôle de la coascendance en vue de limiter la consanguinité et la perte de diversité génétique doivent faire l'objet d'études plus poussées (Wei et Lindgren, 1993). Une étude de simulation est actuellement en cours afin d'élaborer les données nécessaires au perfectionnement des contrôles de coascendance, de manière à réaliser des gains efficaces tout en minimisant la consanguinité et la perte de diversité (T.J. Mullin, données non publiées).

Problèmes à prévoir et possibilités

La stratégie alternative d'amélioration génétique envisagée dans ces pages est basée sur une pollinisation contrôlée suivie d'une production de plançons pour la reforestation. Étant donné que le plan est appliqué à la première série de matériel du programme d'hybridation de seconde génération, notre modèle de test de descendance visait plusieurs objectifs, susceptibles de nécessiter certains compromis. À titre d'exemple, le modèle d'accouplement visait la production de descendance pour la sélection de générations ultérieures ainsi que pour les tests de descendance. Trois modèles de tests différents, c.-à-d. test de descendance biparentale appliqué à des semis, test de réplication clonale et test accéléré sont utilisés moyennant un coût de plus en plus élevé. Toutefois, l'hybridation et la vérification

constituent les étapes les plus importantes de la stratégie et l'information et l'expérience acquises dans le cadre du plan faciliteront la mise en oeuvre de la prochaine série de matériel de seconde génération. À titre d'exemple, en cas d'absence d'écart importants entre ACS, la sélection ACS en amont et le croisement répété ne seront peut-être pas nécessaires au niveau du prochain groupe.

Vu que la production de porte-greffes dans le cadre de la stratégie se fait par boutures racinaires, il est essentiel que le matériel de la production pousse comme des semis. Cela ne semble pas poser de problème au niveau des modèles de sélection en amont lorsqu'on utilise de très jeunes semis comme plants donateurs. Toutefois, il est moins certain que les procédures utilisées pour assurer la juvénilité durant le test de descendance permettra également d'éliminer les effets cumulatifs fixés (Lerner, 1958; Libby, 1976) au niveau de la sélection clonale en aval. Dekker-Robertson et Kleinschmit (1991) ont constaté qu'en recourant à la propagation sérielle de l'épinette de Norvège, aucun problème sérieux relié à la maturation ne survenait durant sept ou huit cycles de propagation soit une période d'environ 20 ans.

Les techniques d'embryogenèse somatique (SE) s'avèrent prometteuses, sur le plan de l'amélioration de l'efficacité des systèmes de multiplication végétative, particulièrement en conjonction avec la cryopréservation (Klimaszewska et al., 1992). Depuis les premières expériences de SE réussies officiellement (Nagamani et Bonga, 1985; Hakman *et al.*, 1985), des progrès rapides ont été réalisés et les plants produits par SE (plantules somatiques) sont cultivés sur une base routinière avec des taux de succès relativement élevés (Park *et al.*, 1993, Adams *et al.*, 1993). La SE s'intègre bien à nos stratégies. Plus précisément, elle aura une incidence importante sur la stratégie de sélection clonale en aval, étant donné qu'elle offre la possibilité de maintenir les clones dans un état juvénile par cryopréservation

tout en réalisant des tests sur le terrain. La SE mobilise une main-d'oeuvre importante; toutefois, des recherches intensives sont réalisées par Ressources naturelles Canada à Fredericton afin de mettre au point des systèmes automatisés de culture des plantules somatiques.

Comme nous l'avons mentionné, un chiffre total de 400 clones sélectionnés pour la seconde génération seront utilisés dans le cadre d'un programme général d'hybridation à différentes périodes, étant donné que les tests de famille de première génération sont répartis sur dix ans. La stratégie d'hybridation actuelle inclut seulement 80 des régions provenant de trois séries de tests de famille réalisés entre 1979 et 1981, ce qui permet d'assurer la liaison avec les sélections effectuées durant cette période. Nous nous attendons à ce que la mise en oeuvre du programme d'hybridation de seconde génération nécessite au total quatre étapes réparties sur les dix prochaines années; de plus, pour chaque étape, quatre des six lignes secondaires (de 80 à 120 clones) seront mises en oeuvre. Il est également probable que l'amélioration génétique de troisième génération débute avant que la mise en oeuvre du matériel de seconde génération ne soit terminée et donc, il est possible d'élaborer des plans d'hybridation pour les générations de matériel de reproduction qui se chevauchent.

L'actualisation des plans d'hybridation proposés dans ce document permettra d'acquérir des précisions et de l'expérience pratique en matière de mise en oeuvre des prochaines séries de lignes secondaires ou de la prochaine génération de matériel de reproduction. Si la mise en oeuvre sur une base expérimentale s'avère efficace, la stratégie conventionnelle d'amélioration génétique sera vraisemblablement remplacée par des stratégies alternatives pertinentes. À titre d'exemple, si la plus grande partie de la variance génétique est imputable aux effets additifs reliés à l'absence de variance ACS, la mise en oeuvre de la sélection ACS en amont et d'un modèle de croisement répété n'est pas garantie. De plus, la

mise en oeuvre de lignes secondaires à différentes périodes permet l'adoption de différentes stratégies suffisamment flexibles pour permettre la modification des objectifs lorsque nécessaire.

Plusieurs chercheurs ont également prôné le recours à l'autofertilisation pour l'amélioration génétique (Lindgren et Gregorius, 1977, Lindgren, 1986). Ce concept mérite peut-être d'être étudié de manière plus approfondie. L'amélioration génétique basée sur les lignes secondaires provoquera une augmentation du taux de consanguinité, en raison essentiellement de la taille des lignes secondaires. Lindgren (1986) révélait que l'autofertilisation génère une variance génétique qui peut être utilisée à des fins de sélection; la méthode est cependant complexe et coûteuse en termes de durée. Il suggérait de se limiter à utiliser les génotypes les mieux classés pour l'autofertilisation provoquée. Notre ligne secondaire élite pourrait se prêter à de telles méthodes. Elle pourrait être répartie en deux lignes secondaires de manière à mettre au point des lignes secondaires à forte consanguinité qui feraient l'objet de croisements en retour avec les lignes secondaires des générations précédentes.

Références bibliographiques

- Adams, G.W., M. Doiron, Y.S. Park, J.M. Bonga et P.J. Charest. 1993. A pilot-scale application of somatic embryogenesis in black spruce tree improvement program. For Chron. (présentation)
- Beaudoin, R., J. Lamontagne, M.-J. Mackay, A. Rainville, A. Stipanovic, G. Vallée et M. Villeneuve. 1991. Amélioration des arbres forestiers à la direction de la recherche du ministère des forêts du Québec. Délibérations de la 23^{ème} assemblée de l'Association canadienne pour l'amélioration des arbres. Publié par Magnussen, S, J. Lavereau et T. Boyle, Part 1: 61-68.

- Carson, M.J. 1986. Advantages of clonal forestry for *Pinus radiata* - Real or imagined. N.Z.J. For. Sci. 16: 403-415.
- Coles, J.F. 1979. New Brunswick Tree Improvement Council makes impressive strides. For. Chron. 55: 32-33.
- Dekker-Robertson, D.L. et J. Kleinschmidt. 1991. Serial propagation in Norway spruce (*Picea abies* (L). Karst.) : results from later propagation cycles. Silvae Genet. 40: 202-214.
- Dempfle, L. 1990. Conservation, creation, and utilization of genetic variation. J. Dairy Sci. 73: 2593-2599.
- Flower, D.P. 1986. Stratégies d'amélioration génétique des principales essences d'arbres au Canada. Ressources naturelles Canada, Rapp. d'information M-X-156, p. 30
- Fowler, D.P. 1987. Tree improvement strategies - Flexibility required. Délibérations de la 25^{ème} assemblée de l'Association canadienne pour l'amélioration des arbres - Truro, N.-É. Publié par Morgenstern, E., et T.J.B. Boyle, p. 85-95.
- Greenwood, M.S., G.W. Adams, et M. Gillespie. 1991. Stimulation of flowering by grafted black spruce and white spruce: a comparative study of the effects of gibberellin A4/7, cultural treatments, and environment. Can. J. For. Res. 21: 395-400.
- Hakman, I., L.C.I. Fowke, S. von Arnold et T. Ekrsen. 1985. The development of somatic embryos in tissue cultures initiated from immature embryos of *Picea abies* (Norway spruce). Plant Sci. 38: 53-59.
- Klimaszewska, K. C. Ward et W.M. Cheliak. 1992. Cryopreservation and plant regeneration from embryogenic cultures of larch (*Larix x eurolepis*) and black spruce (*Picea mariana*). J. Exp. Bot. 43: 73-79.
- Lacy, R.C. 1987. Loss of genetic diversity from managed populations: interacting effects of drift, mutation, immigration, selection, and population subdivision. Conservation Biology 1: 143-158.
- Lerner, I.M. 1958. The genetic basis of selection. John Wiley and Sons Inc. NY
- Levy, D.M. 1983. Production of highland black spruce from cuttings. Ministère des Terres et des forêts de Nouvelle-Écosse, note technique n^o 7, Truro (N.-É.), 4 p.
- Libby, W.J. 1976. Discours d'ouverture. Délibérations - IIIFR Joint Meet. on Advanced Generation Breeding. INRA, Bordeaux, France, p. 1-9.
- Libby, W.J. 1990. Advantages of clonal forestry revisited. Délibérations, assemblée conjointe de la West. For Genet. Assoc. et de l'IIIFR - working parties S.2.02-05, -06, -12, -14. Olympia, Wash. 5:18-29.
- Libby, W.J. et R.M. Rauter. 1984. Advantages of clonal forestry. For. Chron. 60: 145-149.
- Lindgren, D. 1986. How should breeders respond to breeding values. Délibérations, assemblée conjointe de l'IIIFR - Working parties on Breeding Theory, Progeny Testing, and Seed Orchards. Williamsburg, VA, N.C. State Tree Improv. Coop. Raleigh, N.C., pp. 361-372.
- Lindgren, D. et H.-R. Gregorious. 1977. Inbreeding and coancestry. Délibérations IIIFR - Joint Meet. on advanced generation breeding. INRA, Bordeaux, France, p. 49-72.
- Meuwissen, T.H.E. et Z. Luo. 1992. Computing inbreeding coefficients in large populations. Genet. Sel. Evol. 24: 305-313.

- Morgenstern, E.K. et D.P. Fowler. 1969. Genetics and breeding of black spruce. *For Chron.* 45: 408-412.
- Morgenstern, E.K. et Y.S. Park. 1991. Breeding of *Picea mariana* (Mill) B.S.P.: seed orchard and clonal approaches. *Silva Fennica* 25: 280-285.
- Mullin, T.J. 1992. Making choices - seedling and clonal options for breeding and reforestation in New Brunswick. Réponse à l'accord de coopération Canada/Nouveau Brunswick pour l'amélioration des arbres.
- Mullin, T.J., et Y.S. Park. 1992. Estimating genetic gains from alternative breeding strategies for clonal forestry. *Can. J. For. Res.* 22: 14-23.
- Mullin, T.J., E.K. Morgenstern, Y.S. Park et D.P. Fowler. 1992. Genetic parameters from clonally replicated test of black spruce (*Picea mariana*). *Can. J. For. Res.* 22: 24-36.
- Nagamani, R. et J.M. Bonga. 1985. Embryogenesis in subcultured callus of *Larix decidua*. *Can. J. For. Res.* 15: 1088-1091.
- Park Y.S. et J.M. Bonga. 1993. Conifer micropropagation: its function in tree improvement programs. *Dans* Micropropagation of woody plants. Publié par Ahuja, M.R. Kluwer Acad. Pub. p. 457-470.
- Park, Y.S. et D.P. Fowler. 1987. Genetic variances among clonally propagated populations of tamarack and the implications for clonal forestry. *Can. J. For. Res.* 17: 1175-1180.
- Park, Y.S., S.E. Pond et J.M. Bonga. 1993. Initiation of somatic embryogenesis in white spruce (*Picea glauca*): genetic control, culture treatment effects, and implications for tree breeding. *Theor. Appl. Genet.* 86: 427-436.
- Rogers, D.L. 1990. The black spruce clonal forestry program in northern Ontario. In Proc. of Twenty-second Meet. of Canadian Tree Improv. Assoc. Edmonton, Alberta. Publié par Yeh, F.C., J.I. Klein et S. Magnussen, Part 2: 79-80.
- Shaw, D.V. et J.V. Hood. 1985. Maximizing gain per effort by using clonal replicates in genetic tests. *Theor. Appl. Genet.* 71: 392-399.
- Simpson, J.D. 1992. Plus tree selection in New Brunswick. N.B. Tree Improv. Council Tech. Rep. No. 5. *For. Can. Maritimes Reg.* 19 p.
- Smyth, J.H. et A.J. Brownwright. 1986. Forest tree production centres in Canada - 1984. Ressources naturelles Canada, Centre de recherche forestière des Grands Lacs, Rapp. d'inf. O-X-378, 53 p.
- Sulzer, A.M., M.S. Greenwood, W.H. Livingston et G.W. Adams. 1993. Early selection of black spruce using physiological and morphological criteria. *Can. J. For. Res.* 23: 657-664.
- Tier, B. 1990. Computing inbreeding coefficients quickly. *Genet. Sel. Evol.* 22: 419-430.
- van Bujitenen, J.P. et W.J. Lowe. 1979. The use of breeding groups in advanced generation breeding. *Délibérations - 15th South. For. Tree Improv. Conf.* p. 55-65.
- Wei, R.-P. et D. Lindgren. 1991. Selection effects on diversity and genetic gain. *Silva Fennica* 25: 229-234.
- Wei, R.-P. et D. Lindgren. 1993. Phenotypic selection was more efficient than combined index selection when applied on full sibs of lodgepole and Scots pine. In Proc. of "*Pinus contorta* - from untamed forest to domesticated crop." Assemblée de l'IIIFR WP 2.02.06 and Frans Kempe Symposium, Umea, 24-28 août 1992. Publié par D. Lindgren, Dept. of

Forest Genetics and Plant Physiology, Swedish University of Agricultural Sciences, p. 289-292.

Williams, C.G. et C.C. Lambeth. 1992. Genetic improvement using an elite breeding population, Réunion de l'IIIFR consacrée à l'amélioration génétique des arbres tropicaux, Cali, Colombie.