

**EFFETS DE LA MASSE ET DE LA DIMENSION DES GRAINES D'ÉPINETTE
NOIRE (*PICEA MARIANA* [MILL.] B.S.P.) SUR LE TAUX DE
GERMINATION ET LA SURVIE DES SEMIS PRODUITS
EN RÉCIFIANTS**

par

Denis Walsh et Daniel Lord

Département des Sciences Fondamentales

et

Groupe de Recherche en Productivité Végétale

Université du Québec à Chicoutimi

Partenaire du Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale

Chicoutimi (Québec) G7H 2B1

Projet No. 9 520 263

Soumis à : Henrico Laberge, directeur régional

Ministère des Ressources Naturelles du Québec

3 950 boul. Harvey

Jonquière (Québec) G7X 8L6

Octobre 1996

**EFFETS DE LA MASSE ET DE LA DIMENSION DES GRAINES D'ÉPINETTE
NOIRE (*PICEA MARIANA* [MILL.] B.S.P.) SUR LE TAUX DE
GERMINATION ET LA SURVIE DES SEMIS PRODUITS
EN RÉCIPIENTS**

par

Denis Walsh et Daniel Lord

Département des Sciences Fondamentales

et

Groupe de Recherche en Productivité Végétale

Université du Québec à Chicoutimi

Partenaire du Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale

Chicoutimi (Québec) G7H 2B1

Projet No. 9 520 263

Soumis à : Henrico Laberge, directeur régional

Ministère des Ressources Naturelles du Québec

3 950 boul. Harvey

Jonquière (Québec) G7X 8L6

Octobre 1996

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières.....	II
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	VI
Résumé.....	1
Introduction générale.....	2
Section I: Amélioration du taux d'occupation des alvéoles par sélection des graines selon leur provenance, leur masse, leur longueur et leur largeur.....	3
Introduction.....	3
Matériel et méthodes.....	8
Choix des provenances.....	8
Test de germination.....	8
Analyses statistiques.....	10
Résultats.....	14
Germination et émergence en fonction de la provenance des graines.....	14
Germination et émergence en fonction de la masse des graines.....	20
Germination et émergence en fonction de la longueur des graines.....	24
Germination et émergence en fonction de la largeur des graines.....	27
Germination et émergence en fonction du tamisage des graines.....	31
Germination et émergence en fonction de l'année de récolte des cônes.....	34
Germination et émergence des graines sélectionnées selon un critère de masse.....	35
Germination et émergence des graines d'épinette noire et d'épinette blanche prétraitées.....	37
Discussion.....	39
Section II : Traitements des semences qui augmentent le taux de germination.....	48
Introduction.....	48

Traitements chimiques des semences.....	48
L'enrobage et l'encapsulation des graines.....	49
L'amorçage des graines par osmoconditionnement.....	51
La revigoration des graines.....	54
La technique IDS.....	55
Le semis de graines prégermées.....	58
Discussion.....	60
Conclusion et recommandations.....	63
Remerciements.....	66
Références.....	67
Annexes A.....	72

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.	Pourcentage de germination des 20 lots de graines d'épinette noire classés par domaine écologique. La fonction de Gompertz, $%G = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$, a servi à tracer les courbes de régression	16
Fig. 2.	Pourcentage d'émergence des 20 lots de graines d'épinette noire classés par domaine écologique. La fonction de Gompertz, $%E = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$, a servi à tracer les courbes de régression	19
Fig. 3.	Distribution des fréquences de la masse pour l'ensemble des graines d'épinette ainsi que les statistiques descriptives	20
Fig. 4.	Pourcentage de germination et d'émergence des graines d'épinette noire classées par leur masse. La masse augmente de la classe 1 à la classe 10. La fonction de Gompertz, $% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$, a servi à tracer les courbes de régression	22
Fig. 5.	Pourcentage de germination ■ et d'émergence ○ des graines d'épinette noire classées par leur masse. $%G =$ pourcentage de germination, $%E =$ pourcentage d'émergence, $M =$ masse des graines (mg).....	23
Fig. 6.	Distribution des fréquences de la longueur pour l'ensemble des graines d'épinette noire ainsi que les statistiques descriptives	24
Fig. 7.	Pourcentage de germination et d'émergence des graines d'épinette noire classées par leur longueur. La longueur augmente de la classe 1 à la classe 10. La fonction de Gompertz, $% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$, a servi à tracer les courbes de régression.....	27
Fig. 8.	Pourcentage de germination ■ et d'émergence ○ des graines d'épinette noire classées par leur longueur. $%G =$ pourcentage de germination, $%E =$ pourcentage d'émergence, $L =$ longueur des graines (mm).....	27
Fig. 9.	Distribution des fréquences de la largeur pour l'ensemble des graines d'épinette noire ainsi que les statistiques descriptives	28
Fig. 10.	Pourcentage de germination et d'émergence des graines d'épinette noire classées par leur largeur. La largeur augmente de la classe 1 à la classe 6. La fonction de Gompertz, $% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$, a servi à tracer les courbes de régression	29
Fig. 11.	Pourcentage de germination ■ et d'émergence ○ des graines d'épinette noire classées par leur largeur. $%G =$ pourcentage de germination, $%E =$ pourcentage d'émergence, $l =$ largeur des graines (mm).....	30

Fig. 12.	Pourcentage de germination et d'émergence des graines d'épinette noire classées par tamisage; classe 1 < 18 mesh, classe 2 = 18 mesh, classe 3 = 16 mesh, classe 4 = 14 mesh. La fonction de Gompertz, $% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$, a servi à tracer les courbes de régression.....	32
Fig. 13.	Pourcentage de germination ■ et d'émergence O des graines d'épinette noire classées par tamisage. %G = pourcentage de germination, %E = pourcentage d'émergence, l = largeur moyenne des graines (mm) des fractions du tamisage.....	33
Fig. 14.	Régressions linéaires du pourcentage de germination ■ et d'émergence O des graines d'épinette noire en fonction de l'année de récolte des cônes. %G = pourcentage de germination, %E = pourcentage d'émergence.....	35
Fig. 15.	Pourcentage de germination et d'émergence des graines d'épinette noire et d'épinette blanche traitées ■ et non-traitées O. La fonction de Gompertz, $% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$, a servi à tracer les courbes de régression.....	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Classification et caractéristiques des lots de graines d'épinette noire.....	9
Tableau 2.	Dimension des graines d'épinette noire en fonction du tamisage.....	10
Tableau 3.	Analyse de variance de la masse, de la longueur et de la largeur des graines d'épinette noire et test des comparaisons des moyennes de Tukey; les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à $P \leq 0,05$. Les comparaisons sont faites entre les zones, les domaines à l'intérieur des zones Domaine(Z) et les lots à l'intérieur des domaines Lot(D).....	15
Tableau 4.	Analyse de variance du pourcentage de germination et d'émergence (% de survie après 38 jours) des graines d'épinette noire de chaque domaine écologique et test des comparaisons des moyennes de Tukey. Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à $P \leq 0,05$	17
Tableau 5.	Paramètres des équations linéaires du nombre de jours de la germination et de l'émergence en fonction de la masse, de la longueur ou de la largeur pour l'ensemble des graines d'épinette noire. Les variables sont : Jour = nombre de jours de la germination ou de l'émergence; M = masse de la graine (mg); L = longueur (mm); l = largeur (mm).....	20
Tableau 6.	Classification des graines d'épinette noire en fonction de leur masse (mg); N = nombre de graines par classe, M = moyenne (mg), Min. = minimum, Max. = maximum.....	21
Tableau 7.	Analyse de variance des courbes de germination et d'émergence (% de survie après 38 jours) des graines d'épinette noire classées en fonction de leur masse; les courbes ont été tracées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour} B))$	23
Tableau 8.	Classification des graines d'épinette noire en fonction de leur longueur; N = nombre de graines par classe, L = longueur moyenne (mm).....	24
Tableau 9.	Analyse de variance des courbes de la germination et de l'émergence des graines d'épinette noire classées en fonction de la longueur; les courbes ont été tracées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour} B))$	26
Tableau 10.	Classification des graines d'épinette noire en fonction de leur largeur; N = nombre de graines par classe, l = largeur moyenne (mm).....	28

Tableau 11.	Analyse de variance des courbes de la germination et de l'émergence des graines d'épinette noire classées en fonction de leur largeur; les courbes ont été tracées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(\text{Jour } B))$	30
Tableau 12.	Nombre de graines et moyenne \pm écart-type de la masse, de la longueur et de la largeur des graines d'épinette noire en fonction des fractions du tamisage; N nombre de graines, M = masse moyenne, L = longueur moyenne, l = largeur moyenne	31
Tableau 13.	Analyse de variance des courbes de la germination et de l'émergence des graines d'épinette noire classées par fraction de tamis; les courbes ont été tracées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$	33
Tableau 14.	Nombre de graines et moyenne \pm écart-type de la masse, de la longueur et de la largeur des graines d'épinette noire en fonction de l'année de la récolte des cônes; N nombre de graines, M = masse moyenne, L = longueur moyenne, l = largeur moyenne	34
Tableau 15.	Analyse de variance du pourcentage de germination et d'émergence des graines d'épinette noire en fonction de l'année de récolte des cônes.....	34
Tableaux 16.	Corrélation de Pearson entre la longitude et la latitude des lots de graines d'épinette noire, l'année de la récolte des cônes, la masse, la longueur et la largeur des graines, le % de germination et le % de survie après 38 jours	35
Tableau 17.	Comparaisons du pourcentage de germination et de survie entre le nombre total de graines d'épinette noire et la fraction dont les graines ont une masse supérieure à 1,300 mg.....	36
Tableau 18.	Comparaisons du pourcentage de germination et de survie entre le nombre total de graines d'épinette noire et les fractions de tamisage 2, 3 et 4	36
Tableau 19.	Analyse de variance des courbes de la germination et de l'émergence en fonction du temps des graines d'épinette noire traitées et non-traitées; les courbes ont été calculées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$	37
Tableau 20.	Analyse de variance des courbes de la germination et de l'émergence en fonction du temps des graines d'épinette blanche traitées et non-traitées; les courbes ont été calculées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$	37

RÉSUMÉ

Le tri des graines d'épinette noire en fonction de leur masse, leur longueur et leur largeur a été évalué pour éliminer les graines qui ont un faible potentiel germinatif, permettant ainsi le semis d'une seule graine par alvéole dans une production commerciale de plants en récipient. Vingt lots de graines d'épinette noire provenant de la région Saguenay-Lac St-Jean ont été sélectionnés pour étudier les variations liées à la provenance. Les graines ont été séparées dans des tamis et la longueur, la largeur et la masse de chaque graine ont été mesurées. La masse des graines d'épinette noire varie significativement entre les zones écologiques mais leur longueur et leur largeur ne sont pas significativement différentes. Les graines provenant de la zone boréale sont plus légères que celles provenant des vergers à graines ou de la forêt mixte et la masse est corrélée à la latitude du peuplement d'origine. La germination et l'émergence des graines provenant de la pessière noire étaient plus lentes et plus faibles par rapport aux autres domaines écologiques particulièrement chez certains lots où le pourcentage final de survie des semis ne dépassait pas 56%. Le pourcentage de survie des semis n'est que de 32% pour les graines dont la masse est inférieure à 0,8 mg tandis qu'il atteint plus de 80% pour les graines dont la masse est supérieure à 1,3 mg. Ainsi, l'élimination des graines dont la masse est inférieure à 1,3 mg permettrait d'augmenter le taux d'occupation des alvéoles de 14% en moyenne. Cependant, cette augmentation n'est pas suffisante pour préconiser le semis d'une seule graine par alvéole puisque l'occupation des alvéoles ne dépasserait pas 95% dans le meilleur des cas. Une proportion importante de graines qui ont commencé à germer n'ont pas émergé de la silice et l'écart entre le pourcentage de germination et d'émergence est d'autant plus grand que la graine est légère. La difficulté des semis d'émerger au dessus de la silice qui sert de matière de recouvrement est le facteur critique limitant le taux d'occupation des alvéoles. Les recherches ultérieures devraient être axées sur les causes du faible taux d'émergence puisque les méthodes de séparation ou de conditionnement des graines risquent d'être inefficaces puisque la mortalité des graines durant l'émergence causerait une diminution du taux d'occupation des alvéoles rendant le semis d'une graine par alvéole probablement non-rentable.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'une des premières préoccupations des producteurs de plants forestiers est d'avoir, lors de l'ensemencement, des lots de graines de bonne qualité. Pour être efficace, le programme de récolte de cônes et de semences d'arbres doit viser à produire des semences de la meilleure qualité possible. C'est en effet depuis 1969 que le ministère des forêts a traduit cette préoccupation dans son organisation, par le Service de l'amélioration des arbres (Robitaille 1992). Depuis plus de trente ans au Québec, il y a eu énormément d'amélioration dans le contrôle des provenances des semences, le traitement des semences et l'évaluation de leur qualité (Campagna 1992).

Les coûts liés à l'opération éclaircie-repiquage est l'une des préoccupations exprimées par les producteurs de plants forestiers lors du Colloque «Les semences forestières» organisé par le Service de l'amélioration des arbres et par le Service du transfert de technologie du Ministère des Forêts tenue à Sainte-Foy les 12 et 13 février 1992. Par exemple, il serait important d'étudier les différents procédés permettant de séparer les semences qui germent de celles qui ne germent pas (Goyer 1992).

Suite aux propos échangés concernant les graines d'épinette noire lors de la rencontre du 19 septembre 1995 entre les gens du MRN et les chercheurs du Consortium, il a été suggéré que le tri des graines en fonction de leur poids pourrait améliorer le potentiel germinatif des lots de graines d'épinette noire.

Nous avons donc soumis le projet qui consiste à réaliser des tests germination avec des graines d'épinette noire de différentes provenances en étudiant trois paramètres, la région écologique, le poids et le taux de germination, afin d'identifier de nouveaux critères de sélection qui nous permettraient d'ensemencer une graine par cavité. Une revue de littérature exhaustive sur cette problématique complète le travail expérimental.

SECTION I : AMÉLIORATION DU TAUX D'OCCUPATION DES ALVÉOLES PAR SÉLECTION DES GRAINES SELON LEUR PROVENANCE, LEUR MASSE, LEUR LONGUEUR ET LEUR LARGEUR

Introduction

Le programme de reboisement du Ministère des Richesses Naturelles du Québec nécessite un approvisionnement constant en semences de haute qualité et donc la cueillette et le traitement de millions de cônes de résineux; ainsi, la production de 100 millions de plants de résineux nécessite la récolte de 10 000 hectolitres de cônes par an (Lamontagne 1983). La qualité des semences peut être optimisée par la sélection rigoureuse des sources de graines, la récolte de semences mûres seulement durant les bonnes années semencières, le conditionnement soigné et l'optimisation des conditions de conservation des semences entreposées (Wang 1983). Au Québec, le Centre de semences forestières de Berthier fournit les semences forestières à tous les producteurs privés et gouvernementaux (Brault et Campagna 1992). L'épinette noire est l'essence la plus importante et représente plus de 50% des plants reboisés.

La faculté germinative des semences détermine la réussite ultime d'une production en récipient puisque le pépiniériste vise un taux d'occupation des alvéoles de près de 100 % dans un laps de temps réduit pour rentabiliser ses opérations (Carlson 1981). Pour obtenir un taux optimal d'occupation des alvéoles, l'ensemencement multiple est la norme lorsque le taux de germination des graines est faible (Nyborg et Shikaze 1974). Les semoirs sont donc calibrés pour délivrer un nombre prédéterminé de graines calculé en fonction de l'estimation du taux de germination en modifiant la pression de l'air du vacuum et l'ouverture des collecteurs de graines. Cependant, cette pratique occasionne des coûts additionnels en main-d'oeuvre puisque les semis doivent être éclaircis à la main pour ne laisser qu'un seul semis par alvéole. Durocher (1992) a estimé que lorsque trois à quatre graines sont semées par alvéole, les opérations d'éclaircie, de repiquage et

de triage représentent 12% des coûts de production en tunnel ou en serre, soit 8% du revenu du producteur. D'après Arp *et al.* (1989), la sous-occupation des alvéoles est plus coûteuse que la sur-occupation puisque le coût du regarnissage est beaucoup plus élevé que celui de l'éclaircie; au Nouveau-Brunswick, au moins deux graines d'épinette noire sont semées par alvéole même pour les lots dont le taux de germination est supérieur à 93%. Le ministère des forêts de la Colombie Britannique recommande de semer deux graines par alvéole même pour les lots de graines qui ont un taux de germination supérieur à 96% (Leadem *et al.* 1990). Le nombre optimum de semences par alvéole dépend aussi de la précision du semoir; la principale source de variation est causée par le nombre de graines agglomérées aux orifices du semoir qui varie en fonction de la forme et du poids des semences (Arp *et al.* 1989). D'après Silc et Winston (1979), la calibration des semoirs basée sur le nombre de graines par gramme peut aussi être affectée par l'augmentation du poids de la graine à la suite de l'absorption de l'eau par celles-ci lorsque le taux relatif d'humidité de l'air est élevé.

Pour être certain d'obtenir un taux d'occupation compatible avec une production économiquement rentable, il est donc important d'augmenter la qualité et le calibrage des lots de graines d'épinette noire avant d'envisager la possibilité de ne semer qu'une seule graine par alvéole. La stratégie du Ministère des Ressources Naturelles du Québec pour l'amélioration des semences forestières repose sur deux principes importants : l'utilisation de semences provenant de zones de collection déjà testées et la sélection d'arbres supérieurs au point de vue génotypique pour la production de semence ou leur reproduction dans des vergers à graines (Lamontagne 1983). Dans chaque région administrative, les zones semencières sont désignées d'après les régions forestières et le transfert de semences est limité au minimum sauf dans le cas des provenances supérieures qui peuvent être disséminées plus largement lorsque les résultats des tests de provenance antérieurs montrent des avantages au point de vue de la croissance des semis. Des tests de provenance ont montré que l'épinette noire peut être déplacée jusqu'à 1° de latitude au nord de son lieu d'origine et que certains lots ont une supériorité de 50% par rapport à certaines sources locales. Les

meilleurs peuplements sont utilisés immédiatement comme sources de graines pour le reboisement ou sont propagés dans des vergers à graines. Des jeunes peuplements (naturels ou artificiels) ont été aménagés pour la production des cônes sur la base de leur supériorité génétique. L'aménagement des zones de production comprend l'éclaircie et la fertilisation qui augmente d'une manière importante la production des cônes. La nutrition minérale joue un rôle important dans la production des cônes; des essais de fertilisation dans des vergers à graine d'épinette noire en Ontario montrent qu'un gain de 70% en volume de cônes récoltés peut être espéré (Skeates et Haavisto 1995a).

Vingt-quatre vergers à graines couvrant au total 588 ha ont été établis dans différentes régions du Québec pour produire des semences d'épinette noire améliorées (Lamontagne 1992). Les vergers à graines proviennent des semences récoltées sur les arbres qui présentent les meilleurs phénotypes. La sélection est pratiquée sur une base régionale, c'est-à-dire dans le territoire desservi par le futur verger à graines afin de conserver la diversité génétique. En 1994, 32% des semences utilisées pour le reboisement au Québec provenaient des vergers à graines (Brault 1996). Vers l'an 2 000, la majorité des plants nécessaires au programme de reboisement seront propagés à partir de semences provenant de plants génétiquement améliorés (Lamontagne 1992). Les gains de croissance espérés seraient de 25% pour la croissance en hauteur et de 32% pour la croissance en volume (Rainville *et al.* 1996).

La disponibilité limitée des semences forestières améliorées nécessite la recherche de critères permettant de sélectionner uniquement les graines qui ont un réel potentiel de germination. La manière la plus simple est d'évaluer si des critères physiques comme le poids de la graine ou ses dimensions peuvent être corrélés au potentiel de germination. Il était de pratique courante en Alberta de trier les graines d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) en fonction du poids et de semer uniquement 5 à 20% des graines les plus lourdes pour la production de plants en récipients (Hellum 1976). Dans les peuplements naturels d'épinette noire, le taux de germination

est d'ailleurs corrélé à la masse de la graine (Morgenstern 1969). Wang *et al.* (1994) ont montré que le taux de survie des semis d'épinette noire cultivés en récipients augmente proportionnellement à la masse de la graine. Ces relations ont aussi été observées chez l'épinette blanche (Khalil 1986; Mercier et Langlois 1992).

La masse des graines d'épinette noire varie en fonction de la latitude et du régime hydrique des peuplements d'origine (Morgenstern 1969). Ainsi, la masse et le taux de germination des graines d'épinette noire diminuent en fonction de la latitude et sont aussi plus faibles chez les peuplements croissant sur des sites humide. Les différences entre les taux de germination sont dues à l'effet maternel et/ou sont spécifiques aux sites (Wang et MacDonald 1992). La fertilité des sites humides est plus faible, ce qui influence la composition des graines. La qualité de la graines est aussi reliée à la maturité de l'embryon qui est accompagnée de changements physiologiques tel que l'accumulation de réserves en carbohydrates, en lipides et des concentrations en régulateur de croissance (Edwards 1980). Au point de vue morphologique, une graine a atteint sa maturité lorsque l'embryon et l'endosperme sont complètement développés. Le développement de l'embryon sert d'ailleurs d'indice de maturité chez de nombreuses espèces résineuses; lorsque l'embryon occupe 75% de la cavité embryonnaire, la semence est considérée mature (Edwards 1980). Chez l'épinette blanche, la semence atteint sa pleine maturité lorsque l'embryon occupe 90% de la cavité embryonnaire et le degré de maturité est fortement corrélé à la sommation des degrés-jours (Mercier et Langlois 1992).

Plusieurs traitements de semences ont été développés en agronomie pour augmenter la valeur des semences en améliorant le taux de germination et la croissance initiale des semis; citons l'enrobage des semences, les traitements d'amorçage ou d'envigoration de même que le semis de semences pré-germées (Taylor et Harman 1990). Appliquées à la foresterie, ces nouvelles méthodes pourraient limiter les effets des stress environnementaux lors de la phase critique de la

germination, augmenter le taux et l'uniformité du taux de germination et donc l'efficacité dans l'utilisation des semences forestières.

L'objectif général de la section I de ce projet est de déterminer si le triage des graines d'épinette noire en fonction de critères physiques tel que la masse, la longueur ou la largeur permettrait d'éliminer les graines qui ont un faible potentiel germinatif, permettant ainsi le semis d'une seule graine par alvéole dans une production commerciale de plants en récipients. L'importance de l'effet maternel sur la masse et la dimension des graines a aussi été examinée. L'atteinte de cet objectif signifie pour l'industrie : 1) une diminution des coûts de production par l'élimination de l'étape de l'éclaircie, ce qui peut avoir des incidences importantes sur la rentabilité d'une production en serre ou en tunnel, 2) une production plus uniforme et un gain de croissance des semis 3) une meilleur utilisation des ressources biologiques limitées que sont les graines provenant des vergers à graines. Le traitement d'amorçage des graines a été étudié sur un lot de graines d'épinette blanche et d'épinette noire. La section II consiste en une revue de littérature des traitements susceptibles d'augmenter le potentiel de germination des semences.

Matériel et Méthodes

Choix des provenances

Vingt lots de graines d'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) provenant de la région 02 (Saguenay Lac-St-Jean) ont été fournis par le Centre de semences forestières de Berthier. Les lots 1 à 4 proviennent de vergers à graines récoltés en 1994 tandis que les autres lots ont été récoltés en forêt en 1982, 1984, 1986, 1988 et 1990 (tableau 1). La masse des semences varie de 10 à 28 g pour 1 000 graines et le taux de pureté est d'au moins 99 %. Le taux de germination estimé par le Centre de semences forestières de Berthier varie de 50 à 99 %.

Test de germination

Cent vingt graines ont été échantillonnées aléatoirement dans chaque lot. Les graines ont été séparées dans des tamis (14, 16 et 18 mesh) et classées en quatre fractions (tableau 2). La longueur et la largeur de chaque graine ont été mesurées sous un binoculaire à plus ou moins 0,1 mm. Chaque graine a ensuite été pesée individuellement avec une balance électronique Mettler MT5 à plus ou moins 0,001 mg.

Les graines ont été placées aléatoirement dans les alvéoles (largeur 0,5 mm, hauteur 10 mm) de micro-plaques ELISA remplies de fine silice. La base de chaque alvéole avait été percée pour permettre l'irrigation par bassinage et un drainage adéquat. Les micro-plaques ont ensuite été placées dans une chambre à environnement contrôlé. La température était de 30°C pendant 8 heures et 26°C pendant 16 heures. L'éclairage était fourni par des lampes à vapeur de sodium haute pression durant la période de température élevée. Un couvercle en plastique recouvrait les micro-plaques pour maintenir une humidité relative proche de 100%. Le nombre de graines germées était enregistré tous les jours durant une période de 21 jours. Les graines étaient considérées germées lorsque la racicule perçait le tégument.

Tableau 1. Classification et caractéristiques des lots de graines d'épinette noire.

Lot	Provenance*	No. du contenant*	Germination		Nombre de semences/kg x 1000	Zone†	Domaine†	Région†	Canton	Unité de gestion	Lat.	Long.	Date de récolte
			(année-mois)	% du dernier test									
1	EPN-VI-020-Y63-021-94	94-0120	95-06	97	795	verger	-	-	n.d.	21	n.d.	n.d.	1994
2	EPN-VI-023-G85-024-94	94-0043	95-03	99	801	verger	-	-	Garnier	24	48°45'	71°40'	1994
3	EPN-VI-025-K13-026-94	94-0045	95-03	96	848	verger	-	-	Levy	26	49°50'	74°50'	1994
4	EPN-VI-027-F26-027-94	94-0040	95-03	98	768	verger	-	-	Dolbeau	27	48°55'	72°05'	1994
5	EPN-NI-08E-M69-021-90	90-0504	95-05	94	807	boréale	8	8E	Plessis	21	48°15'	71°30'	1990
6	EPN-NI-09D-Y28-022-84	88-5017	96-02	96	1 011	boréale	9	9D	Lac Elaine	22	48°35'	73°20'	1984
7	EPN-NI-09D-Y28-022-84	88-5018	96-02	96	1 011	boréale	9	9D	Lac Elaine	22	48°35'	73°20'	1984
8	EPN-NI-06B-O98-023-88	88-0919	95-12	91	763	mixte	6	6B	Tremblay	23	48°30'	71°00'	1988
9	EPN-NI-06B-O98-023-88	88-0920	96-02	93	763	mixte	6	6B	Tremblay	23	48°30'	71°00'	1988
10	EPN-NI-11A-Y37-023-82	91-5025	96-02	86	833	boréale	11	11A	Lac Poulin-de-Courval	23	48°53'	70°30'	1982
11	EPN-A1-12B-K91-025-90	90-0530	95-02	90	954	boréale	12	12B	Marsolet	25	49°40'	72°50'	1990
12	EPN-NI-08H-M67-024-90	90-0535	96-05	94	1 008	boréale	8	8H	Pinsonnault	24	49°25'	71°20'	1990
13	EPN-NI-11A-Y32-024-84	84-2095	96-02	50	1 030	boréale	11	11A	Chûte des Passes	24	49°54'	71°15'	1984
14	EPN-NI-11A-Y32-024-84	84-2200	96-02	59	1 034	boréale	11	11A	Chûte des Passes	24	49°54'	71°15'	1984
15	EPN-NI-12B-Y45-024-86	86-0193	96-02	77	1 011	boréale	12	12B	Lac Etiennish	24	49°35'	71°30'	1986
16	EPN-PI-06A-L96-025-90	90-0528	95-04	98	801	mixte	6	6A	Normandin	25	48°50'	72°35'	1990
17	EPN-NI-11A-L90-025-88	88-0594	96-02	87	932	boréale	11	11A	Niverville	25	50°00'	72°35'	1988
18	EPN-NI-12B-K91-025-84	91-5035	96-02	94	1 082	boréale	12	12B	Marsolet	25	49°40'	72°50'	1984
19	EPN-NI-11A-J74-023-84	88-5028	96-02	79	965	boréale	11	11A	Lefebvre	23	49°10'	70°05'	1984
20	EPN-NI-11A-Y32-024-88	88-0939	96-02	81	886	boréale	11	11A	Chûte des Passes	24	49°54'	71°15'	1988

* : numérotation du Centre de traitement des semences de Berthier.

† : d'après Thibault (1987).

n.d. : non disponible.

Tableau 2. Dimension des graines d'épinette noire en fonction du tamisage.

Fraction	Ouverture (mm)	Tamis (Mesh)	Dimension des graines (mm)
1		< #18	D < 1,00
2	1,00	#18	1,00 < D < 1,18
3	1,18	#16	1,18 < D < 1,40
4	1,40	#14	D > 1,40

Les graines germées étaient transférées dans les alvéoles d'un récipient IPL-67 remplies de tourbe horticole, puis recouvertes de silice. Les graines non-germées étaient disséquées et leur viabilité évaluée par coloration dans une solution 1% de sel de tétrazolium (Grabe 1970). Les récipients étaient disposés aléatoirement dans une serre de verre à l'Université du Québec à Chicoutimi (48°76'N, 73°15'O). Les récipients étaient arrosés régulièrement par des gicleurs automatiques pour maintenir le substrat humide tout au long de la période de germination. La température était maintenue à 28°C le jour et 20°C la nuit et la photopériode était de 16 heures. L'émergence des graines était évaluée à tous les deux jours. Une graine était considérée émergée lorsque les cotylédons étaient visibles. Le taux final de survie a été évalué 38 jours après le semis.

Analyses statistiques

Les moyennes de la masse, de la longueur et de la largeur des graines ont été comparées en fonction de la zone écologique, du domaine écologique (Thibault 1987) et des lots par une analyse de variance dans un dispositif hiérarchique :

$$X_{ijkl} = \mu + Z_i + D_{j(i)} - L_{k(ij)} + e_{ijkl}$$

ou X_{ijkl} est la variable dépendante (masse, longueur ou largeur), μ est la moyenne de la population, Z_i l'effet de la zone écologique, $D_{j(i)}$ l'effet du domaine dans la zone écologique, $L_{k(ij)}$ l'effet du lot dans le domaine écologique et e_{ijkl} l'erreur expérimentale. Le modèle est mixte : Z_i et $D_{j(i)}$ sont fixes tandis que $L_{k(ij)}$ est aléatoire. $D_{j(i)}$ est l'erreur expérimentale pour Z_i et $L_{k(ij)}$ l'erreur expérimentale pour $D_{j(i)}$ (Sokal et Rohlf 1981). Le test de Tukey a été utilisé pour

comparer les moyennes entre elles. Les moyennes sont considérées significativement différentes à $P \leq 0,05$.

Pour chaque lot de graines, les pourcentages de germination et d'émergence des graines en fonction du temps ont été calculés en utilisant le modèle de Gompertz :

$$Y = A e^{-C e^{-(\text{Jour } B)}}$$

où Y est le pourcentage de germination ou d'émergence, A l'asymptote, B le taux de variation de la vitesse de germination ou d'émergence, C un paramètre contrôlant la forme de la courbe et Jour le nombre de jours de la germination ou de l'émergence. La courbe a une forme sigmoïde mais n'est pas symétrique par rapport au point d'inflexion qui se situe à $0,368 A$. Le taux de variation de la vitesse de germination ou d'émergence est constante dans le temps : $\delta Y/\delta t = B Y \log(A/Y)$ (Draper et Smith 1981). Pour simplifier le modèle, l'asymptote A a été fixée égale au pourcentage final de germination ou d'émergence. La convergence des courbes a été réalisée en utilisant la méthode des moindres carrés de la procédure Quasi-Newton du module Nlin du logiciel Systat (1992).

Les pourcentages de germination des graines et la survie des semis après 38 jours de chaque domaine écologique ont été comparés par une analyse de variance et les moyennes comparées entre elles par le test de Tukey. Les pourcentages ont été transformés en arc sinus [$\sqrt{(\%/100)}$] avant l'analyse de variance pour assurer la normalité des distributions (Sokal et Rohlf 1981). Les droites de régressions ont été calculées pour chaque lot de graines en utilisant la masse, la longueur ou la largeur comme variables dépendantes pour expliquer le jour de la germination ou de l'émergence.

Toutes les graines ont été regroupées ensemble et une distribution de fréquences a été générée permettant de définir 10 classes de masse. Les pourcentages de germination et d'émergence des graines en fonction du temps ont été calculés en utilisant le modèle de Gompertz pour chaque

classe. Les mêmes procédures ont été utilisées pour comparer les classes de longueur (10 classes), les classes de largeur (6 classes) et les fractions du tamisage (4 fractions). Vu le faible nombre de graines dans la fraction 4, les fractions 3 et 4 ont été regroupées avant l'analyse. Les courbes de régression ont été comparées entre elles en utilisant la méthode décrite dans Mead et Curnow (1983). La somme des carrés d'écart résiduel (S.C.E.) est obtenue en régressant une équation regroupant toutes les données et le rapport F est obtenu par :

$$F = \frac{S.C.É. - S.C.É._w / (p_i + g - p - 1)}{S.C.É._w / (N - g - p_i)}$$

où p_i est le nombre de paramètres dans le groupe i , p le nombre de paramètres, g le nombre de groupes, N le nombre de données pour les groupes combinés ($N = \sum n$), $S.C.É._w$ la somme des carrés d'écart résiduel des groupes.

Les relations entre le pourcentage de germination ou d'émergence et la masse, la longueur et la largeur des graines ont été évaluées à l'aide d'une fonction parabolique:

$$Y = A[1 - e^{-K(X - X_0)}]$$

où Y est le pourcentage de germination ou d'émergence, A l'asymptote, k le taux d'accroissement de Y , X les variables explicatives (masse, longueur ou largeur), X_0 la valeur de X lorsque $Y = 0$ (Potvin *et al.* 1990). Les relations entre la latitude et la longitude des provenances, l'année de la récolte des cônes, la masse, la longueur et la largeur des graines, le pourcentage de germination et de survie 38 jours après le semis ont été évaluées par le coefficient de corrélation de Pearson. L'influence de l'âge des graines a été étudiée par la régression linéaire du pourcentage de germination ou de survie en fonction de l'année de récolte des cônes. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées en utilisant le logiciel Systat (1992).

En sus des analyses portant sur les 20 lots de graines décrits au tableau 1, les mêmes analyses ont été faites sur un lot de graines d'épinette noire (Prov. EPN-N1-6B-098-023-88) et un lot de graines d'épinette blanche (Prov. EPB-NI-5D-H65-023-90) ayant subi un traitement de pré-

conditionnement effectué par la compagnie NORSECO¹. Le procédé d'induction de la germination (amorçage) utilisé par NORSECO est un procédé exclusif en Amérique du Nord qui consiste à mêler les semences dans un milieu d'argile humide pendant une certaine période. Les détails du traitement ne nous ont pas été communiqués. Cent vingts graines traitées de chaque espèce ont été sélectionnées au hasard de même que 120 autres graines de chaque espèce non-traitées qui ont servi de témoins. Le test de germination a été exécuté de la même façon que précédemment.

¹ NORSECO, 2914 Boulevard Labelle, Laval, Québec H7P 5R9

Résultats

Germination et émergence en fonction de la provenance des graines

La masse des graines d'épinette noire varie significativement entre les zones écologiques ($P = 0,02$) mais leur longueur et leur largeur ne sont pas différentes (tableau 3). Les graines provenant de la forêt boréale sont significativement plus légères que celles provenant des vergers à graines ou de la forêt mixte; ces graines pèsent en moyenne 1,081 mg comparativement à 1,287 et 1,254 mg pour les graines provenant de la forêt mixte ou des vergers à graines. La masse, la longueur et la largeur des graines ne sont pas significativement différentes ($P \geq 0,18$) entre les différents domaines de la forêt boréale mais des différences significatives ($P \leq 0,0001$) ont été observées entre les lots à l'intérieur des domaines. Dans les vergers à graines, les graines du lot 3 sont significativement plus légères que les graines du lot 4 tandis que dans la forêt mixte, les graines du lot 9 sont significativement plus légères que les graines du lot 8. Il existe des différences significatives de masse, de longueur et de largeur entre les lots de la sapinière à bouleau blanc (domaine 8), entre les lots de la pessière noire à sapin et mousse (domaine 11) et entre les lots de la pessière noire à mousse (domaine 12). Les graines des lots 12, 13, 14 et 18 sont plus légères et de plus petites dimensions que celles des lots du même domaine écologique.

Les courbes du pourcentage de germination des graines d'épinette noire ont été calculées pour chaque lot à l'aide de la fonction de Gompertz. Pour tous les lots, les modèles calculés expliquent plus de 99% de la variabilité retrouvée et les paramètres de chaque courbe apparaissent au tableau A1 en annexe. Les premières graines ont germé trois jours après le semis et la germination était complétée à 90% après 4,2-4,9 jours pour les lots provenant des vergers à graines ou de la sapinière (fig. 1, domaines 6, 8 et 9). Le pourcentage final de germination pour ces lots était supérieure à 95% (tableau 4). La vitesse de germination des lots de graines provenant de la pessière (domaines 11 et 12) était plus lente surtout pour les lots 13 et 14 puisque 90% du taux final de germination n'était atteint qu'après 8,3 et 7,1 jours respectivement.

Tableau 3. Analyse de variance de la masse, de la longueur et de la largeur des graines d'épinette noire et test des comparaisons des moyennes de Tukey; les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à $P \leq 0,05$. Les comparaisons sont faites entre les zones, les domaines à l'intérieur des zones Domaine(Z) et les lots à l'intérieur des domaines Lot(D).

Source	d.l.	Masse			Longueur			Largeur		
		C.M.	F	P	C.M.	F	P	C.M.	F	P
Zone	2	8,91	17,0	0,023	5,34	3,8	0,150	0,41	5,4	0,102
Domaine(Z)	3	0,53	0,6	0,643	1,40	1,9	0,181	0,08	0,4	0,732
Lot(D)	14	0,93	20,0	<0,0001	0,75	15,3	<0,0001	0,18	12,5	<0,001
Erreur	2 374	0,05			0,05			0,01		

Zone	Domaine	Lot	Masse (mg)	Longueur (mm)	Largeur (mm)
Verger	-	1	1,234 ab	2,46 a	1,29 a
	-	2	1,287 ab	2,53 ab	1,32 a
	-	3	1,197 a	2,48 ab	1,29 a
	-	4	1,298 b	2,57 b	1,33 a
Moyenne verger			1,254 b	2,51 a	1,31 a

Mixte	6	8	1,355 b	2,52 a	1,35 a
	6	9	1,241 a	2,50 a	1,33 a
	6	16	1,264 ab	2,57 a	1,30 a
Moyenne mixte			1,287 b	2,53 a	1,33 a

Boréale	8	5	1,287 b	2,58 b	1,34 b
	8	12	0,997 a	2,35 a	1,26 a
	<i>Moyenne</i>		<i>1,142 a</i>	<i>2,47 a</i>	<i>1,30 a</i>
	9	6	1,053 a	2,39 a	1,25 a
	9	7	1,065 a	2,36 a	1,29 a
	<i>Moyenne</i>		<i>1,059 a</i>	<i>2,38 a</i>	<i>1,27 a</i>
	11	10	1,217 c	2,50 b	1,33 c
	11	13	0,990 a	2,30 a	1,25 ab
	11	14	0,975 a	2,27 a	1,21 a
	11	17	1,046 ab	2,27 a	1,28 bc
	11	19	1,135 bc	2,41 b	1,29 bc
	11	20	1,143 c	2,35 a	1,33 c
	<i>Moyenne</i>		<i>1,084 a</i>	<i>2,35 a</i>	<i>1,28 a</i>
	12	11	1,068 ab	2,33 b	1,29 b
	12	15	1,079 b	2,33 b	1,28 b
12	18	0,975 a	2,23 a	1,22 a	
<i>Moyenne</i>		<i>1,041 a</i>	<i>2,30 a</i>	<i>1,26 a</i>	
Moyenne boréale			1,081 a	2,37 a	1,28 a

C.M. : carré moyen.

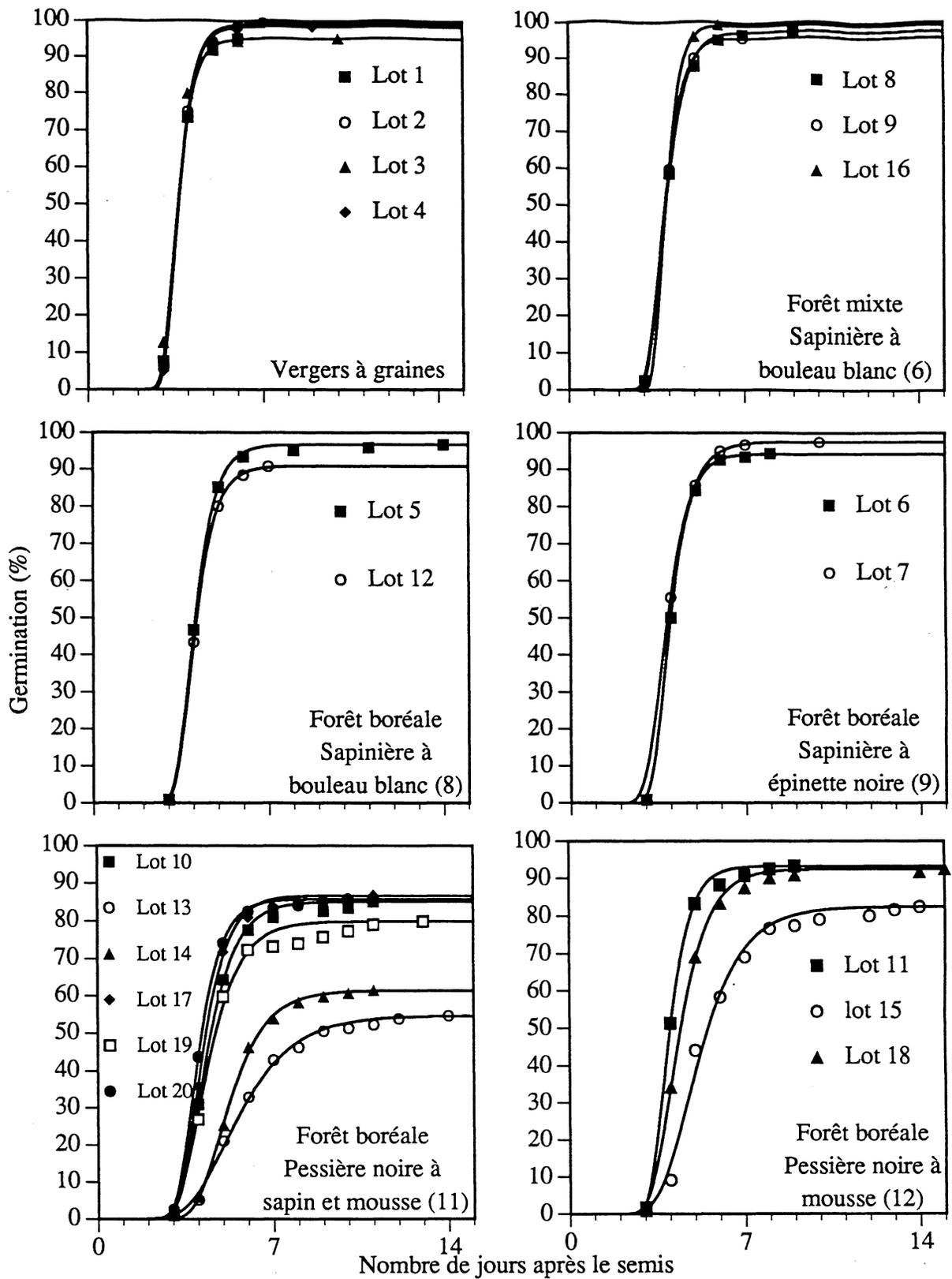


Fig. 1. Pourcentage de germination des 20 lots de graines d'épinette noire classés par domaine écologique. La fonction de Gompertz, $\%G = A \text{Exp}(-C \text{Exp}(-\text{Jour } B))$, a servi à tracer les courbes de régression.

Tableau 4. Analyse de variance des pourcentages de germination et d'émergence (% de survie des semis après 38 jours) des graines d'épinette noire de chaque domaine écologique et test des comparaisons des moyennes de Tukey. Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à $P \leq 0,05$.

Source	d.l.	% germination			% d'émergence		
		C.M.	F	P	C.M.	F	P
Domaine	5	261	5,91	0,004	326	7,60	0,001
Erreur	14	44			43		

Zone	Domaine	Lot	Germination (%)	Émergence (%)	Δ (%)
Verger	-	1	95	83	12
	-	2	99	87	12
	-	3	95	83	12
	-	4	98	87	11
			97 bc	85 b	12
Mixte	6	8	98	85	13
	6	9	96	84	12
	6	16	99	88	11
			98 c	86 b	12
Boréale	8	5	97	82	15 24 ←
	8	12	91	73	18
			94 abc	77 ab	17
	9	6	94	69	25
	9	7	97	71	26
			96 bc	70 ab	16
	11	10	85	58	27
	11	13	55	29	26
	11	14	61	35	26
	11	17	87	63	24
	11	19	80	56	24
	11	20	86	67	19
			76 a	52 a	24
12	11	93	78	15	
12	15	83	50	33	
12	18	93	56	37	
		90 ab	61 ab	29	

C.M. : carré moyen.

% Δ : % germination - % survie.

Le pourcentage final de germination est significativement différent ($P \leq 0,004$) entre les domaines écologiques. Le pourcentage de germination des graines provenant de la pessière noire à sapin et mousse (domaine 11) est significativement plus faible par rapport aux autres domaines

écologiques (tableau 4). Cependant, il est clair que cette différence vient essentiellement de la faible faculté germinative des deux lots récoltés en 1984 à peu près au même endroit soit les lots 13 et 14 (tableau 1). Les autres lots du domaine 11 montrent des taux de germination qui se rapprochent des taux de germination des lots issus des autres domaines, mais qui sont quand même plus petits.

Les graines d'épinette noire qui ont germé ont été transférées dans des récipients IPL-67 et les premières graines ont émergé de la silice sept jours après le semis et 90% du taux final d'émergence était atteint entre 14-15 jours pour les lots provenant des vergers à graines et de la forêt mixte (fig. 2). Le pourcentage d'émergence de ces lots de graines est inférieur de 12% au pourcentage de germination, ne dépassant pas 88% (tableau 4). Le pourcentage final d'émergence des lots provenant de la pessière noire à sapin et mousse (domaine 11) est significativement plus faible par rapport aux autres domaines écologiques (tableau 4). Ces différences sont encore plus marquées pour les lots provenant de la pessière et pas seulement pour les lots 13 et 14 déjà identifiés comme déficient au point de vue de la germination, mais aussi pour les lots 10, 15, 18 et 19 où le pourcentage final d'émergence ne dépasse pas 60% alors que leurs taux de germination varient entre 80 et 93% (tableau 4). Les semis de ces lots émergeaient aussi plus lentement, 90% du taux final d'émergence n'étaient atteints qu'entre 17 et 19 jours, soit un retard de 3 à 5 jours comparativement aux autres.

Les relations entre la masse, la longueur et la largeur des graines et la durée de la germination ou de l'émergence du semis ont ensuite été analysées par des régressions linéaires (tableau 5). Sur l'ensemble des lots de graines, le nombre de jours pour qu'une graine germe ou émerge décroît significativement en fonction de l'un ou l'autre de ces trois paramètres. Cependant, le modèle n'explique qu'une trop faible partie de la variabilité totale ($0,09 \leq r^2 \leq 0,17$) pour tirer quelque conclusion que ce soit. Les paramètres des régressions linéaires pour chacun des lots sont fournis aux tableaux A2, A3 et A4 en annexe.

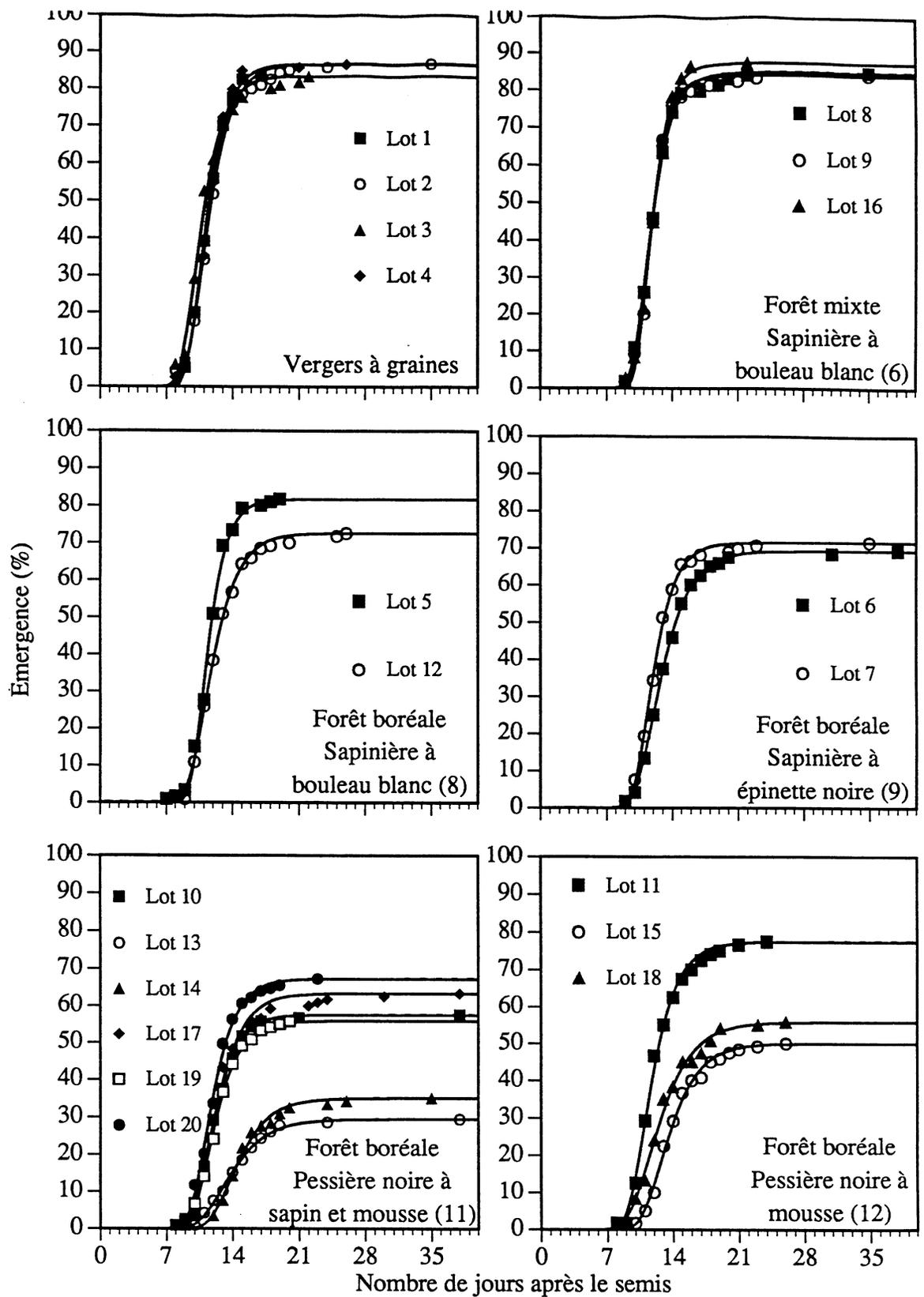


Fig. 2. Pourcentage d'émergence des 20 lots de graines d'épinette noire classées par domaine écologique. La fonction de Gompertz, $\%E = A \text{Exp}(-C \text{Exp}(-\text{Jour } B))$, a servi à tracer les courbes de régression.

Tableau 5. Paramètres des équations linéaires du nombre de jours de la germination et de l'émergence en fonction de la masse, de la longueur ou de la largeur pour l'ensemble des graines d'épinette noire. Les variables sont : Jour = nombre de jours de la germination ou de l'émergence; M = masse de la graine (mg); L = longueur (mm); l = largeur (mm).

Variable	Germination			Émergence		
	Équation	P	r ²	Équation	P	r ²
Masse	Jour = 5,81 - 0,89 M	<0,0001	0,17	Jour = 15,82 - 2,39 M	<0,0001	0,17
Longueur	Jour = 6,11 - 0,55 L	<0,0001	0,11	Jour = 15,77 - 1,14 L	0,0005	0,09
Largeur	Jour = 6,24 - 1,13 l	<0,0001	0,11	Jour = 18,18 - 3,98 l	<0,0001	0,15

Germination et émergence en fonction de la masse des graines

Pour l'ensemble des lots de graines d'épinette noire, la masse varie de 0,583 à 2,653 mg et la distribution des fréquences est normale (fig. 3). Dix classes ont été créées à partir de la distribution des fréquences de la masse des graines, chacune regroupant un minimum de 89 graines (tableau 6).

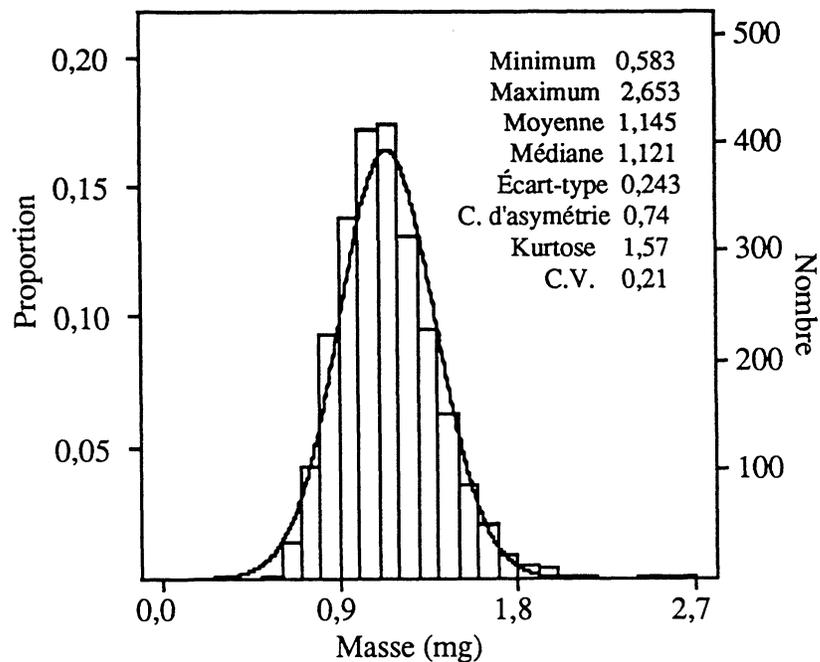


Fig. 3. Distribution des fréquences de la masse pour l'ensemble des graines d'épinette noire ainsi que les statistiques descriptives.

Tableau 6. Classification des graines d'épinette noire en fonction de leur masse (mg); N = nombre de graines par classe, M = moyenne (mg), Min. = minimum, Max. = maximum.

	Classe									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N	137	222	329	414	413	313	227	152	89	98
M	0,734	0,857	0,952	1,052	1,149	1,248	1,348	1,449	1,546	1,767
Min.	0,583	0,801	0,901	1,001	1,101	1,201	1,301	1,401	1,501	1,601
Max. ≤	0,800	0,900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500	1,600	2,653

Les taux de germination et d'émergence ont été étudiés pour chaque classe en utilisant le modèle de Gompertz; les paramètres de chaque courbe sont donnés au tableau A5 en annexe. La vitesse de germination augmente en fonction de la masse de la graine; 90% du taux final est atteint après 6,5 jours pour les graines les plus légères (classe 1) mais seulement 4,8 jours pour les graines les plus lourdes (classe 10) (fig. 4). Les courbes de germination sont significativement différentes ($P < 0,0001$) entre les classes; le pourcentage final varie de 79% pour la classe 1 à 96% pour les classes 7 et 9 (tableau 7). Les différences entre les classes sont encore plus marquées lors de l'émergence du semis (fig. 4). Le pourcentage de survie après 38 jours n'est plus que de 32% pour la classe 1 et atteint 90% pour les classes 9 (tableau 7).

L'écart (Δ) entre le pourcentage de germination des graines et l'émergence des semis diminue en fonction de la masse de la graine; 47% des graines de la classe 1 qui ont germées n'ont pas donné de semis viables tandis que l'écart n'est que de 9% pour les graines de la classe 10 (tableau 7). Les courbes du pourcentage de germination et d'émergence en fonction de la masse de la graine sont de forme paraboliques et plus de 99% de la variabilité mesurée est expliquée par cette relation (fig. 5). Le pourcentage de germination et d'émergence augmente rapidement en fonction de la masse de la graines puis plafonnent rapidement après un seuil équivalent à 1,4 mg environ.

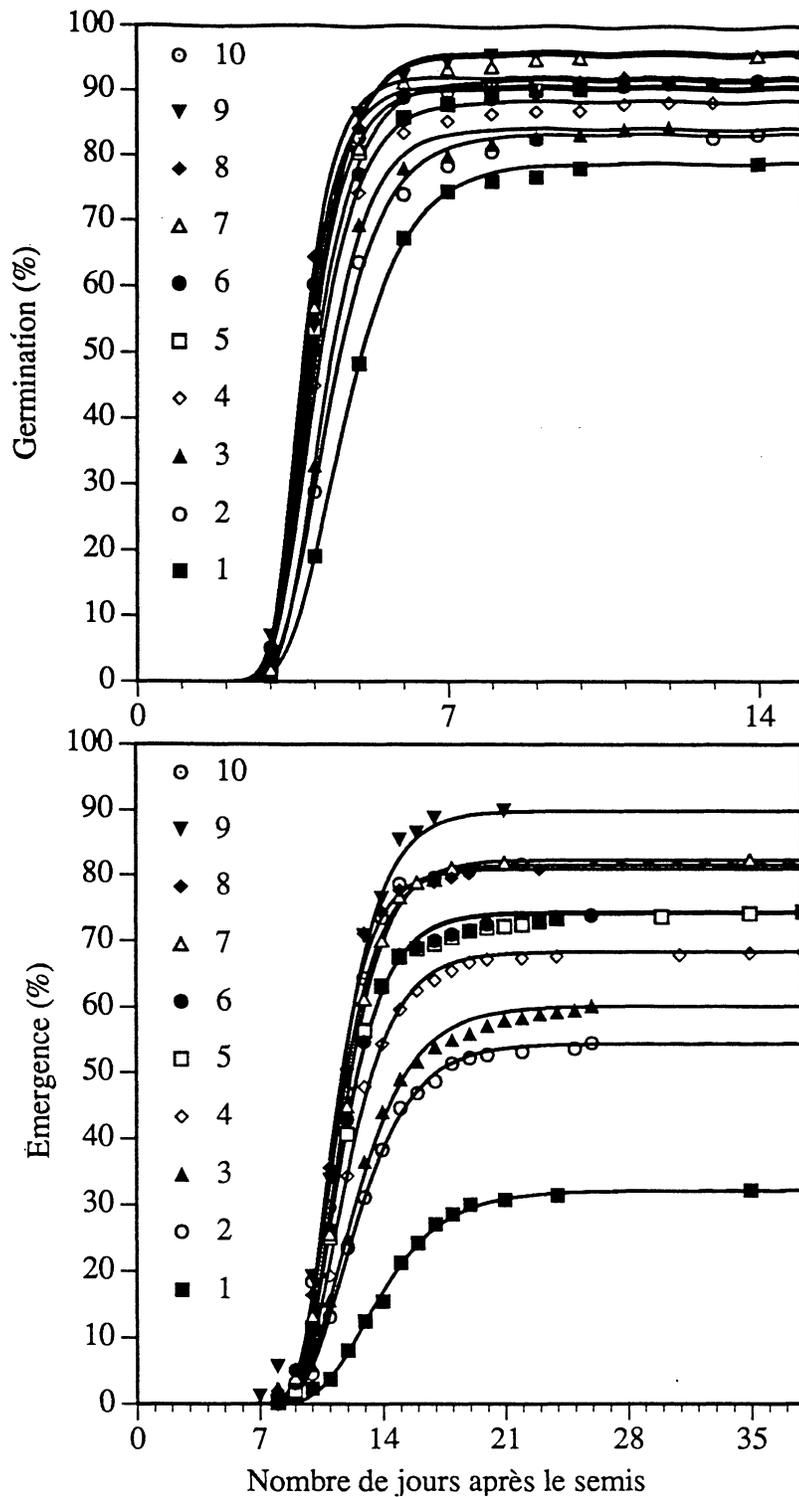


Fig. 4. Pourcentage de germination et d'émergence des graines d'épinette noire classées par leur masse. La masse augmente de la classe 1 à la classe 10. La fonction de Gompertz, $\% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$, a servi à tracer les courbes de régression.

Tableau 7. Analyse de variance des courbes de germination et d'émergence (% de survie après 38 jours) des graines d'épinette noire classées en fonction de leur masse; les courbes ont été tracées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$.

Source	Germination				Émergence			
	d.l.	C.M.	F	P	d.l.	C.M.	F	P
Masse	18	300,05	82,63	<0,0001	18	1 693,97	512,27	<0,0001
Erreur	68	3,63			130	3,31		

Classe	Germination	Émergence	Δ
	(%)	(%)	
1	79	32	47
2	83	55	28
3	84	60	24
4	88	68	20
5	90	74	16
6	92	74	18
7	96	82	14
8	92	81	11
9	96	90	6
10	91	82	9

C.M. : carré moyen.

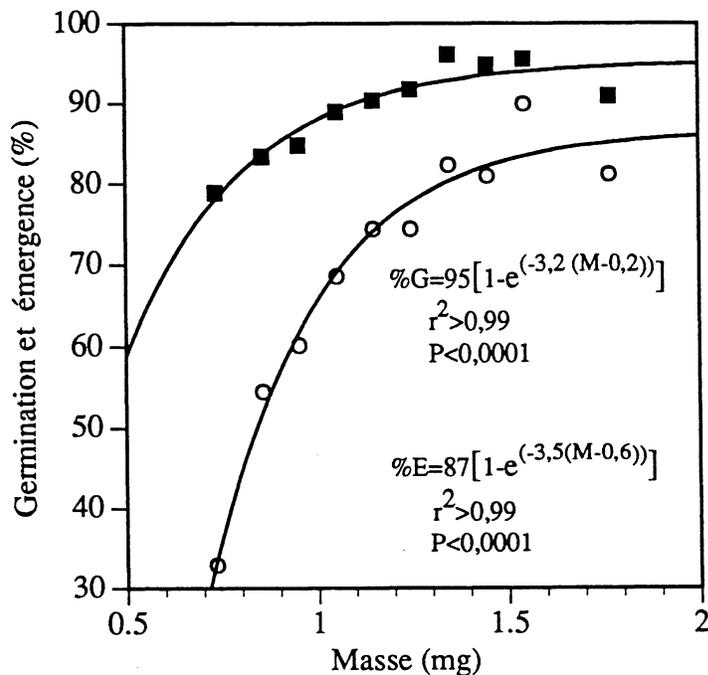


Fig. 5. Pourcentage de germination ■ et d'émergence O des graines d'épinette noire classées par leur masse. %G = pourcentage de germination, %S = pourcentage d'émergence, M = masse des graines (mg).

Germination et émergence en fonction de la longueur des graines

La distribution de la longueur des graines d'épinette noire est normale et varie entre 1,4 à 3,3 mm (fig. 6). Dix classes ont été créées à partir de cette distribution, chacune regroupant au moins 98 graines (tableau 8).

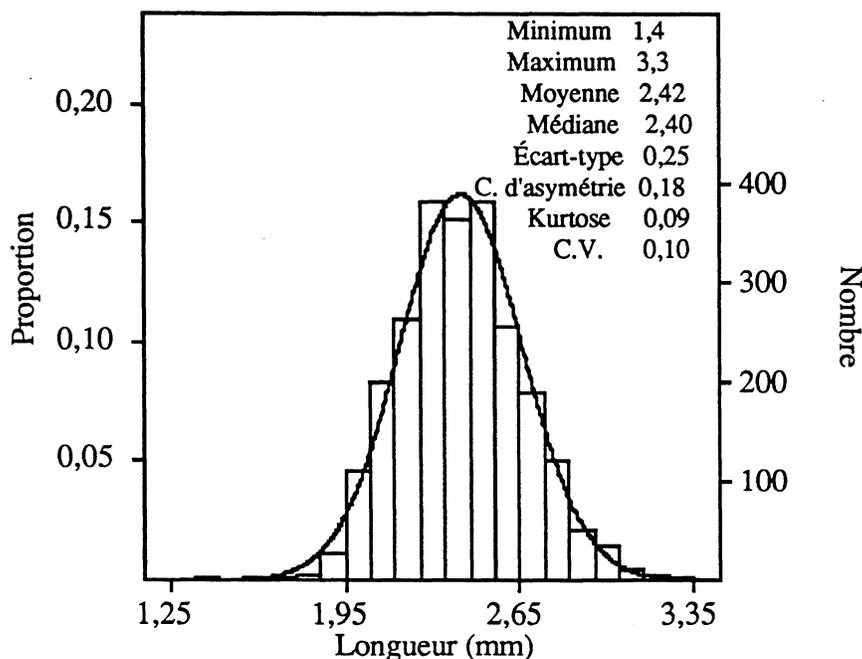


Fig. 6. Distribution des fréquences de la longueur pour l'ensemble des graines d'épinette noire ainsi que les statistiques descriptives.

Tableau 8. Classification des graines d'épinette noire en fonction de leur longueur; N = nombre de graines par classe, L = longueur moyenne (mm).

	Classe									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N	146	199	262	380	364	381	254	189	212	98
L	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	3,0

La figure 7 présente les taux de germination des graines et d'émergence des semis en fonction du temps. Les paramètres des courbes sont présentés au tableau A6 en annexe; 90% de la germination est complétée après 5 à 6 jours tandis que 90% des semis émergent après 14 à 16 jours. Les courbes de germination sont significativement différentes ($P = 0,0005$) entre les classes de longueur. Le pourcentage final de germination varie de 82 à 95% mais n'est pas nécessairement proportionnel à la longueur de la graine (tableau 9). Le taux final de germination

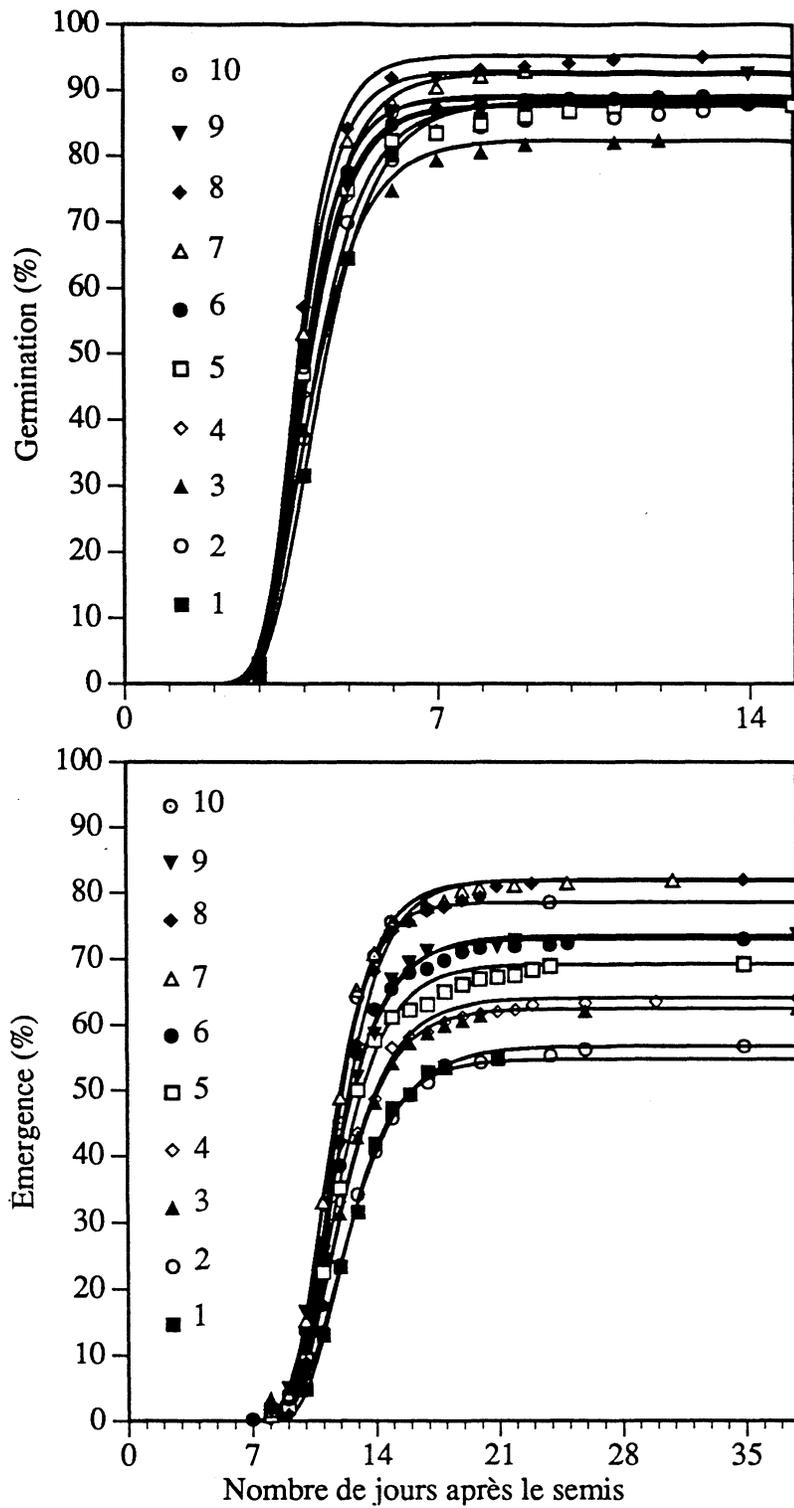


Fig. 7. Pourcentage de germination et d'émergence des graines d'épinette noire classées par leur longueur. La longueur augmente de la classe 1 à la classe 10. La fonction de Gompertz, $\% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$, a servi à tracer les courbes de régression.

augmente linéairement en fonction de la longueur de la graine et cette relation est significative ($P = 0,05$), la régression linéaire expliquant 63% de la variabilité mesurée (fig. 8). Les différences entre les classes de longueur sont plus marquées lors de l'émergence des semis (fig. 7). Les courbes d'émergence sont significativement différentes ($P = 0,0005$) entre elles (tableau 9). Le pourcentage final de survie augmente en fonction de la longueur des graines, variant de 55% pour la classe 1 à 82 % pour les classes 7 et 8. De même, l'écart (Δ) entre le pourcentage de germination et le pourcentage de survie diminue en fonction de la longueur de la graine. Le pourcentage d'émergence varie en fonction de la longueur de la graine en suivant une courbe parabolique qui explique plus de 99% de la variabilité mesurée (fig. 8).

Tableau 9. Analyse de variance des courbes de la germination et de l'émergence des graines d'épinette noire classées en fonction de la longueur; les courbes ont été tracées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{Exp}(-C \text{Exp}(-\text{Jour } B))$.

Source	Germination				Émergence			
	d.l	C.M.	F	P	d.l.	C.M.	F	P
Longueur	18	100	26,38	0,0005	18	562	288,84	0,0005
Erreur	66	4			128	2		

Classe	Germination (%)	Émergence (%)	Δ (%)
1	88	55	33
2	88	57	31
3	82	63	19
4	88	64	24
5	88	69	19
6	89	73	15
7	93	82	11
8	95	82	13
9	93	74	19
10	89	79	10

C.M. : carré moyen.

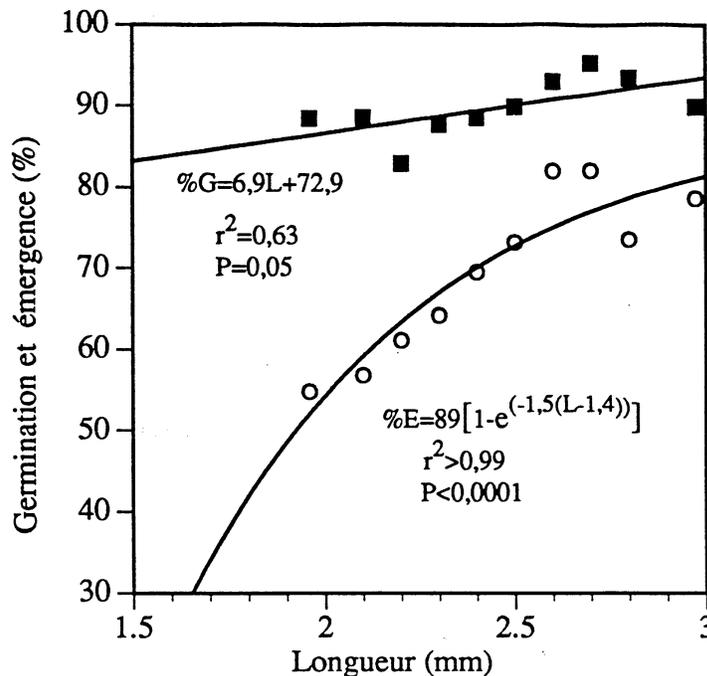


Fig. 8. Pourcentage de germination ■ et d'émergence ○ des graines d'épinette noire classées par leur longueur. %G = pourcentage de germination, %E = pourcentage d'émergence, L = longueur des graines (mm).

Germination et émergence en fonction de la largeur des graines

La largeur des graines d'épinette noire varie entre 0,9 et 1,9 mm et la distribution des fréquences est légèrement asymétrique, les classes de grande largeur étant légèrement sous-représentées (fig. 9). Ceci se reflète dans le petit nombre de graines (37) pour la classe la plus élevée parmi les six classes de largeur définies pour ce travail (tableau 10). Les cinq autres classes regroupent entre 165 et 818 graines.

Les taux de germination et d'émergence ont été étudiés pour chaque classe en utilisant le modèle de Gompertz; les paramètres de chaque courbe sont donnés au tableau A7 en annexe. La vitesse de germination est plus lente pour les graines les moins larges; la germination de la classe 1 est complétée à 90% après 6 jours comparativement à seulement 5 jours pour les quatre autres classes (fig. 10). L'analyse de variance montre que les courbes sont significativement différentes à $P = 0,0005$ (tableau 11). Cependant, le taux final de germination varie très peu entre les classes. Il n'y a pas de relation significative ($P = 0,65$) entre le pourcentage final de germination et la largeur

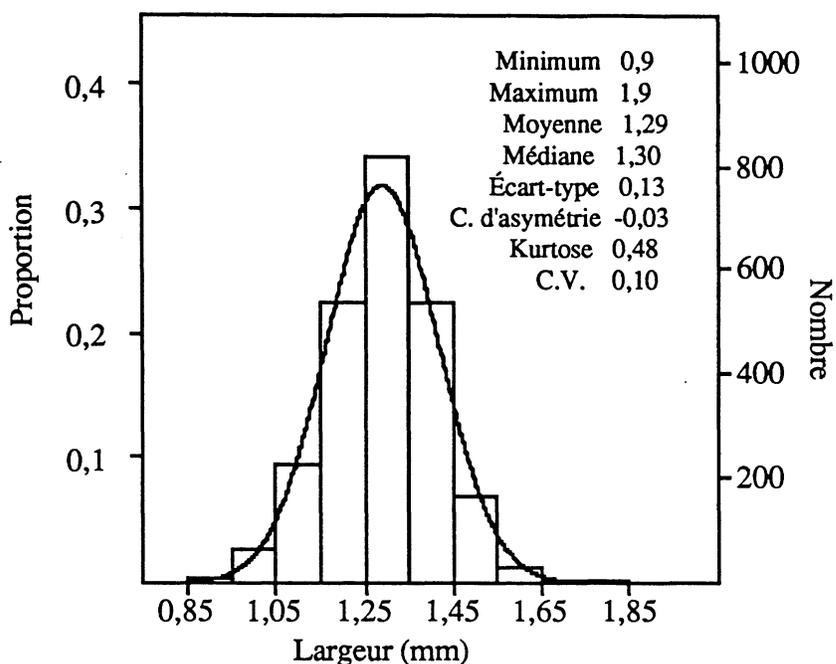


Fig. 9. Distribution des fréquences de la largeur pour l'ensemble des graines d'épinette noire ainsi que les statistiques descriptives.

Tableau 10. Classification des graines d'épinette noire en fonction de leur largeur; N = nombre de graines par classe, l = largeur moyenne (mm).

	Classe					
	1	2	3	4	5	6
N	296	539	818	539	165	37
l	1,07	1,20	1,30	1,40	1,50	1,63

de la graine (fig. 11). Les différences entre les classes sont cependant plus marquées dans le cas de l'émergence des semis (fig. 10). La vitesse et le pourcentage final d'émergence sont plus faibles pour les trois classes de graines les plus petites. Le pourcentage de survie augmente en fonction de la largeur des graines, variant de 54% pour la classe 1 à 78 % pour le classe 4 (tableau 11). La relation entre le pourcentage d'émergence et la largeur de la graine est curviligne, le pourcentage augmentant rapidement jusqu'à 1,3 mm, puis plafonne rapidement (fig. 11). L'écart entre le pourcentage final de germination et le pourcentage de survie atteint 33% pour la classe 1 et diminue à 13% pour la classe 6 (tableau 11).

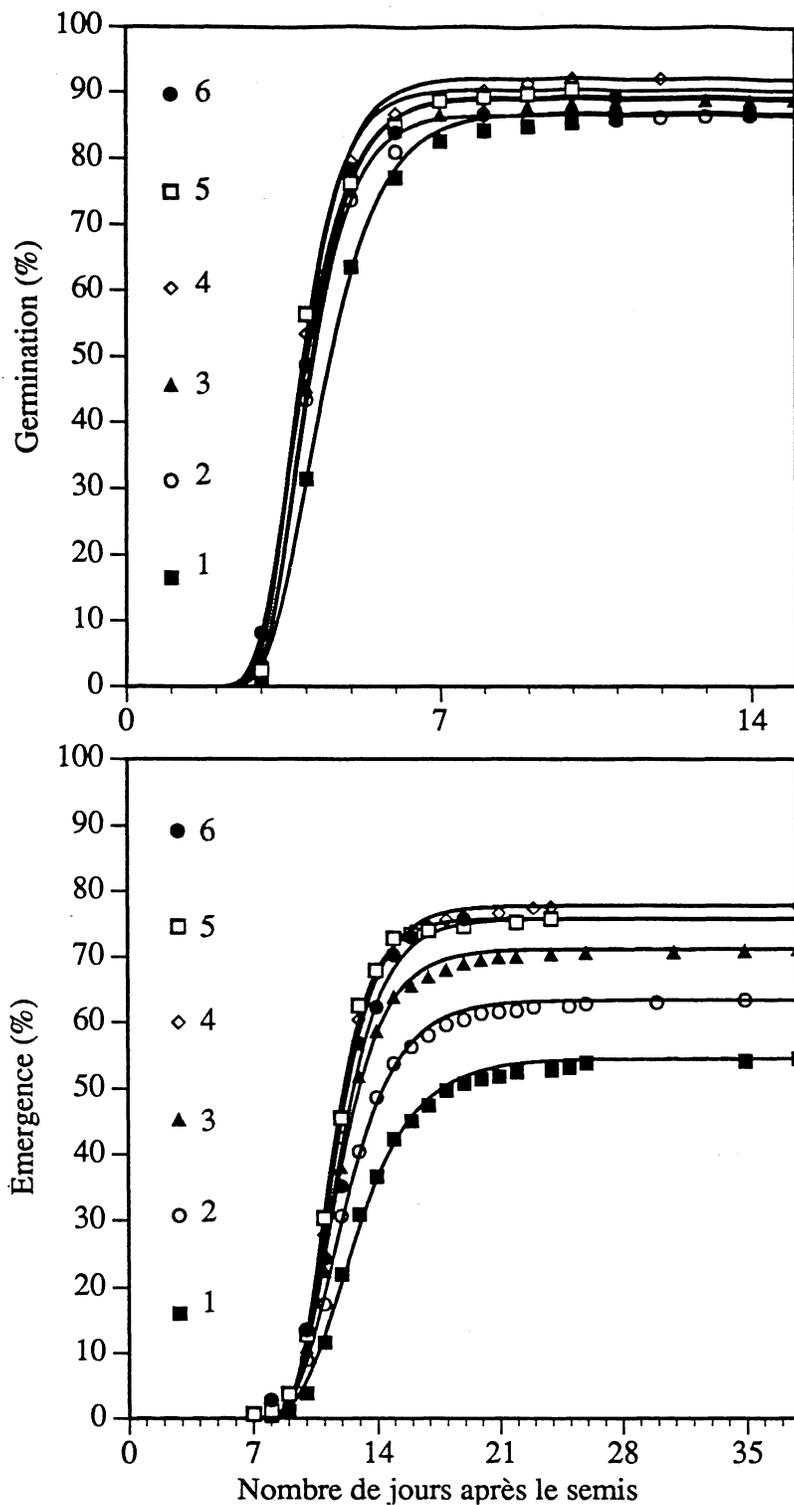


Fig. 10. Pourcentage de germination et d'émergence des graines d'épinette noire classées par leur largeur. La largeur augmente de la classe 1 à la classe 6. La fonction de Gompertz, $\% = A \text{Exp}(-C \text{Exp}(-\text{Jour } B))$, a servi à tracer les courbes de régression.

Tableau 11. Analyse de variance des courbes de la germination et de l'émergence des graines d'épinette noire classées en fonction de leur largeur; les courbes ont été tracées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(\text{Jour B}))$.

Source	Germination				Émergence			
	d.l.	C.M.	F	P	d.l.	C.M.	F	P
Largeur	10	84	21,3	0,0005	10	792	405	0,0005
Erreur	45	4			8	2		

Classe	Germination (%)	Émergence (%)	Δ (%)
1	87	54	33
2	86	63	23
3	89	71	18
4	92	78	14
5	90	76	14
6	89	76	13

C.M. : carré moyen.

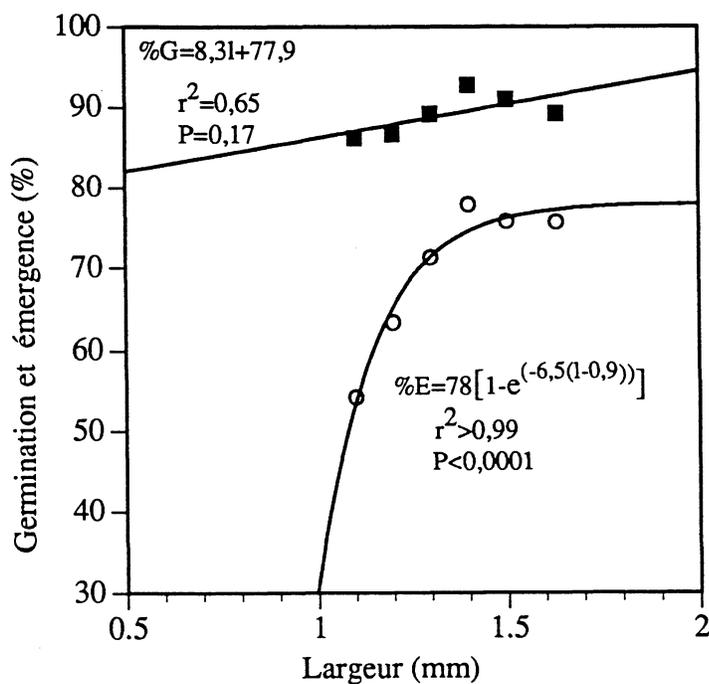


Fig. 11. Pourcentage de germination ■ et d'émergence O des graines d'épinette noire classées par leur largeur. %G = pourcentage de germination, %E = pourcentage d'émergence, l = largeur des graines (mm).

Germination et émergence en fonction du tamisage des graines

Les graines ont été tamisées avant le test de germination pour vérifier si cette méthode permet de séparer efficacement les graines en fonction de leur dimension. Le tamisage permet la séparation des graines en quatre classes dont la largeur moyenne est de 1,2, 1,3, 1,5 et 1,7 mm. (tableau 12). Après le tamisage, les fractions 3 et 4 ont été regroupées pour l'analyse puisque le nombre de graines de la fraction 4 était trop faible.

Les courbes de germination et d'émergence ont été tracées en utilisant la fonction de Gompertz et les paramètres de chaque courbe sont présentés au tableau A8 en annexe. La vitesse et le taux final de germination de la fraction 1 est plus faible par rapport aux autres fractions (fig. 12). Le pourcentage de germination varie de 86% pour la fraction 1 à plus de 90% pour la fraction 3 et 4 (tableau 13). Les différences entre les fractions sont plus marquées lors de l'émergence du semis (fig. 12). La différence entre le taux de germination et de survie est de 27% pour la classe 1 et diminue à 12% pour les classes 3 et 4 (tableau 13). Le pourcentage de germination et d'émergence sont tous les deux fortement corrélés aux classes de diamètres obtenus par tamisage ($r^2 = 0,81$; $r^2 = 0,90$), mais les droites de régression linéaire ne sont pas significatives (fig. 13). Le nombre peu élevé de fractions ne permet pas de prédire avec certitude le pourcentage de germination ou d'émergence en fonction du diamètre après tamisage.

Tableau 12. Nombre de graines et moyenne \pm écart-type de la masse, de la longueur et de la largeur des graines d'épinette noire en fonction des fractions du tamisage; N nombre de graines, M = masse moyenne, L = longueur moyenne, l = largeur moyenne.

	Fraction			
	1	2	3	4
N	789	1 445	157	3
M (mg)	0,931 \pm 0,137	1,212 \pm 0,170	1,590 \pm 0,208	2,416 \pm 0,295
L (mm)	2,3 \pm 0,2	2,5 \pm 0,2	2,6 \pm 0,2	2,8 \pm 0,2
l (mm)	1,2 \pm 0,1	1,3 \pm 0,1	1,5 \pm 0,1	1,7 \pm 0,1

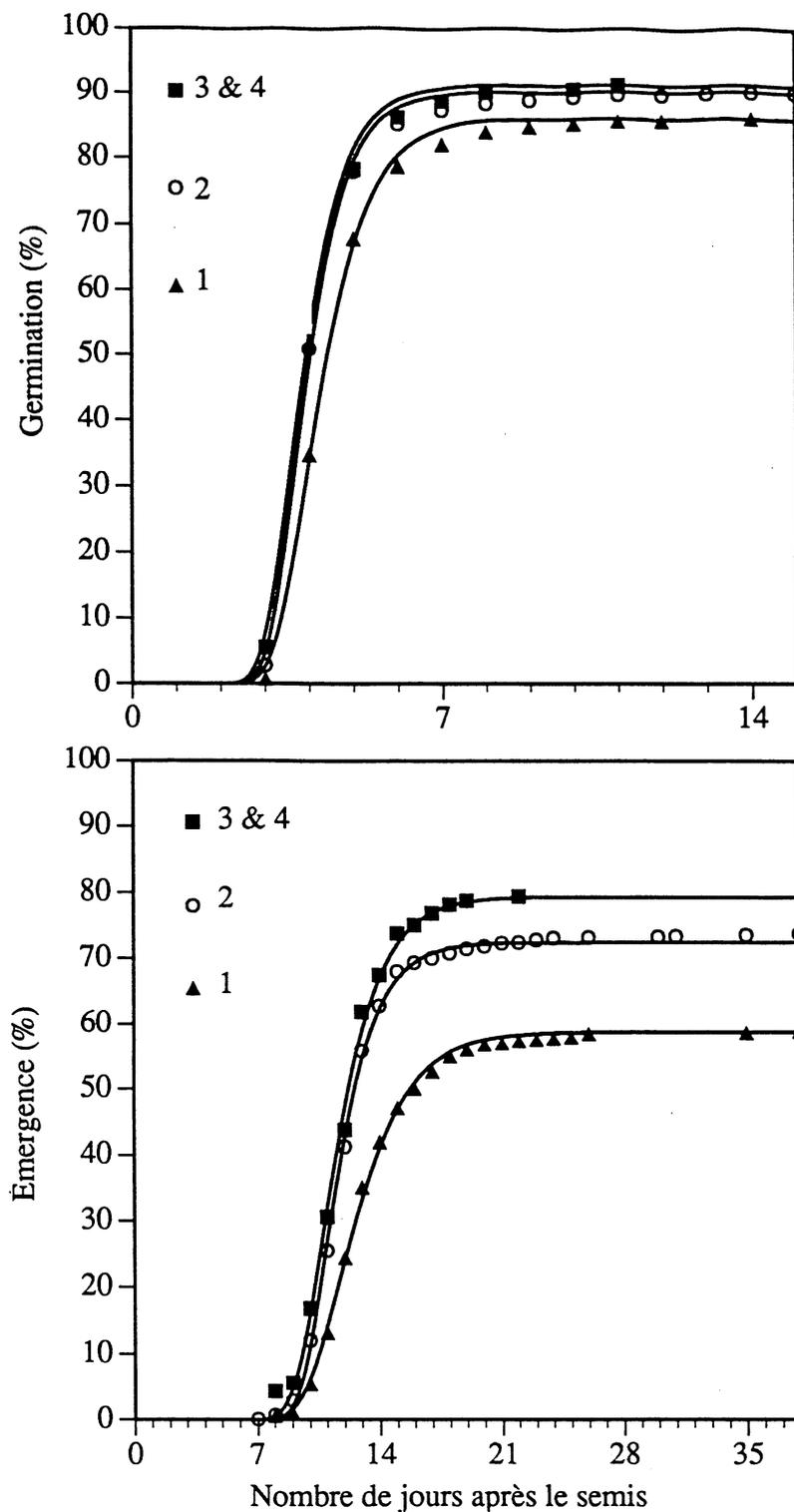


Fig. 12. Pourcentage de germination et d'émergence des graines d'épinette noire classées par tamisage; classe 1 < 18 mesh, classe 2 = 18 mesh, classe 3 = 16 mesh, classe 4 = 14 mesh. La fonction de Gompertz, $\% = A \text{Exp}(-C \text{Exp}(-\text{Jour } B))$, a servi à tracer les courbes de régression.

Tableau 13. Analyse de variance des courbes de la germination et de l'émergence des graines d'épinette noire classées par fraction de tamis; les courbes ont été tracées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$.

Source	Germination				Émergence			
	d.l.	C.M.	F	P	d.l.	C.M.	F	P
Fraction	4	120	36,9	0,0005	4	1 054	771,0	0,0005
Erreur	26	3			51	1		

Classe	Germination (%)	Émergence (%)	Δ (%)
1	86	59	27
2	90	74	16
3-4	91	79	12

C.M. : carré moyen.

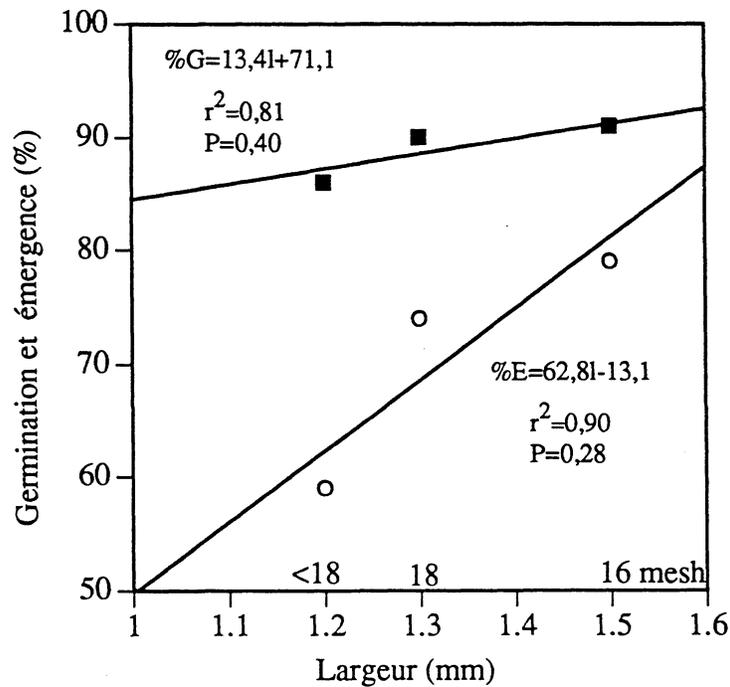


Fig. 13. Pourcentage de germination ■ et d'émergence ○ des graines d'épinette noire classées par tamisage. $\%G$ = pourcentage de germination, $\%E$ = pourcentage d'émergence, l = largeur moyenne des graines (mm) des fractions du tamisage.

Germination et émergence en fonction de l'année de récolte des cônes

Les graines d'épinette noire récoltées en 1984 sont en moyenne plus légères que les autres (tableau 14). Les pourcentages de germination ne varient pas significativement ($P = 0,18$) en fonction de l'année de récolte, mais les pourcentages d'émergence sont significativement différents ($P = 0,005$) entre les années de récoltes (tableau 15). Le pourcentage d'émergence augmente linéairement ($P = 0,0027$) en fonction de l'année de récolte. La régression linéaire du pourcentage de survie en fonction de la date de récolte explique 75% de la variabilité mesurée (fig. 14). Cependant, il est impossible de séparer l'effet de l'âge et de la provenance des graines. On remarque d'ailleurs des écarts importants du taux de germination et d'émergence pour les lots récoltés en 1984 où deux lots sur cinq ont des pourcentages de germination et d'émergence nettement plus bas que la moyenne (fig. 14).

Tableau 14. Nombre de graines et moyenne \pm écart-type de la masse, de la longueur et de la largeur des graines d'épinette noire en fonction de l'année de la récolte des cônes; N nombre de graines, M = masse moyenne, L = longueur moyenne, l = largeur moyenne.

	Année de la récolte des cônes					
	1982	1984	1986	1988	1990	1994
N	120	718	120	477	480	479
M (mg)	1,217 \pm 0,206	1,032 \pm 0,224	1,079 \pm 0,169	1,197 \pm 0,237	1,153 \pm 0,245	1,254 \pm 0,229
L (mm)	2,5 \pm 0,2	2,3 \pm 0,2	2,3 \pm 0,2	2,4 \pm 0,2	2,5 \pm 0,3	2,5 \pm 0,2
l (mm)	1,3 \pm 0,1	1,3 \pm 0,1	1,3 \pm 0,1	1,3 \pm 0,1	1,3 \pm 0,1	1,3 \pm 0,1

Tableau 15. Analyse de variance du pourcentage de germination et d'émergence des graines d'épinette noire en fonction de l'année de récolte des cônes.

Source	Germination				Émergence		
	d.l	C.M.	F	P	C.M.	F	P
Année	5	149	1,77	0,1845	295	5,49	0,0053
linéaire	1	369	4,38	0,0550	712	13,25	0,0027
quadratique	1	2	0,03	0,8704	6	0,11	0,7511
Erreur	14	84			53		
Classe	Germination (%)		Émergence (%)		Δ (%)		
1982	85		58		27		
1984	80		53		27		
1986	83		50		33		
1988	92		75		17		
1990	95		80		15		
1994	97		85		12		

C.M. : carré moyen.

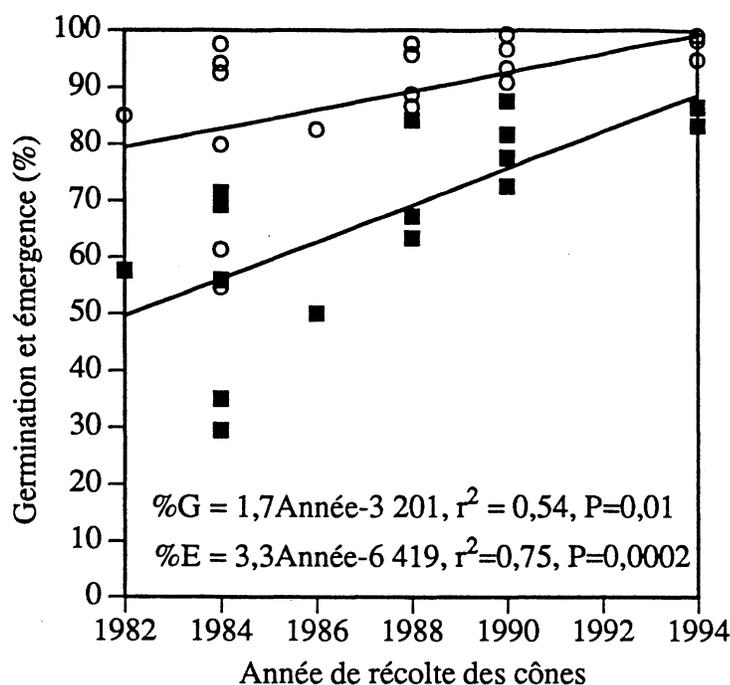


Fig. 14. Régressions linéaires du pourcentage de germination ■ et d'émergence ○ des graines d'épinette noire en fonction de l'année de récolte des cônes. %G = pourcentage de germination, %E = pourcentage d'émergence.

Germination et émergence des graines sélectionnées selon un critère de masse

Les pourcentages de germination et de survie sont corrélés à la masse, à la longueur et à la largeur des graines, à l'année de la récolte et sont inversement corrélés à la latitude des provenances (tableau 16). La masse des graines d'épinette noire est fortement corrélée à la longueur et à la largeur. Ce résultat indique que la construction de modèles allométriques ne permettraient pas d'obtenir de résultats très différents de ceux obtenus en prenant les paramètres seul à seul.

Tableau 16. Corrélation de Pearson entre la longitude et la latitude des lots de graines d'épinette noire, l'année de la récolte des cônes, la masse, la longueur et la largeur des graines, le % de germination et le % de survie après 38 jours.

	Lat.	Long.	Année	Masse	Longueur	Largeur	% germ.	% survie
Lat.	-							
Long.	0,01	-						
Année	-0,09	0,32	-					
Masse	-0,67**	-0,14	0,54*	-				
Longueur	-0,77***	-0,09	0,53*	0,94***	-			
Largeur	-0,55*	-0,26	0,42	0,88***	0,79***	-		
% germ.	-0,56*	0,38	0,54*	0,58**	0,56*	0,54*	-	
% survie	-0,57*	0,31	0,74***	0,73***	0,73***	0,66**	0,92***	-

* : P < 0,5; ** : P < 0,01; *** : P < 0,001.

La possibilité d'augmenter le pourcentage de germination et de survie en utilisant uniquement les graines dont la masse est supérieure à 1,3 mg a été étudiée en regroupant les lots par domaine écologique (tableau 17). L'augmentation du pourcentage de survie la plus importante est réalisée pour les lots de graines provenant de la sapinière à bouleau blanc (domaine 8); le pourcentage de survie augmenterait de 18% si seulement 23% des graines, soit celles de plus de 1,3 mg avait été semées. L'augmentation du pourcentage de survie aurait été de 11% pour les lots provenant de la pessière noire à sapin et mousse (domaine 11). En moyenne, le gain espéré pour l'ensemble des provenances étudiées serait de 14% en utilisant que les graines dont la masse est supérieure à 1,3 mg, soit 24% des graines au total. L'augmentation du pourcentage de survie en utilisant uniquement les graines des fractions 2 à 4 est beaucoup plus faible et est en moyenne de 5% pour l'ensemble des lots (tableau 18), en somme des gains relativement peu importants pour une sélection déjà très sévère au plan pratique.

Tableau 17. Comparaisons du pourcentage de germination et de survie entre le nombre total de graines d'épinette noire et la fraction dont les graines ont une masse supérieure à 1,300 mg.

Domaine	Total		Masse > 1,3 mg			Gain	
	Germ. (%)	Survie (%)	Fraction (%)	Germ. (%)	Survie (%)	Germ. (%)	Survie (%)
Verger	97	85	39	98	91	1	6
Mixte (6)	98	86	44	98	88	0	2
Boréale (8)	94	77	23	98	95	4	18
Boréale (9)	96	70	10	92	71	-4	1
Boréale (11)	76	52	15	83	63	7	11
Boréale (12)	89	61	9	97	69	8	8
Total	89	69	24	95	83	6	14

Tableau 18. Comparaisons du pourcentage de germination et de survie entre le nombre total de graines d'épinette noire et les fractions de tamisage 2, 3 et 4.

Domaine	Total		Fraction 2-3-4			Gain	
	Germ. (%)	Survie (%)	Fraction (%)	Germ. (%)	Survie (%)	Germ. (%)	Survie (%)
Verger	97	85	84	96	86	-1	1
Mixte (6)	98	86	82	97	86	-1	0
Boréale (8)	94	77	63	92	82	-2	5
Boréale (9)	96	70	55	95	73	-1	3
Boréale (11)	76	52	60	81	57	5	5
Boréale (12)	89	61	55	87	66	-2	5
Total	89	69	67	91	74	2	5

Germination et émergence des graines d'épinette noire et d'épinette blanche prétraitées

Les courbes du pourcentage de germination et d'émergence sont significativement différentes entre les graines d'épinette noire traitées et non-traitées (tableau 19). La vitesse de germination et d'émergence des graines d'épinette noire traitées est plus rapide comparativement aux graines non-traitées mais les pourcentages finaux de germination ou d'émergence ne sont pas très différents (fig. 15). Pour l'épinette blanche le traitement a un effet significatif sur la vitesse de germination et d'émergence (tableau 20). La durée de la germination a diminué de plus d'une semaine et le pourcentage final d'émergence passe de 40 à 53%. Dans le cas de l'épinette noire, 100% des graines qui n'ont pas germées étaient non-viables. Pour les graines d'épinette blanche non-traitées, 20% des graines non-germées étaient viables et donc probablement en dormance tandis que ce pourcentage n'était que de 5% pour le lot de graines traitées.

Tableau 19. Analyse de variance des courbes de la germination et de l'émergence en fonction du temps des graines d'épinette noire traitées et non-traitées; les courbes ont été calculées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{Exp}(-C \text{Exp}(-\text{Jour } B))$.

Source	Germination					Emergence				
	d.l.	S.C.E.	C.M.	F	P	d.l.	S.C.E.	C.M.	F	P
Total	10	1 850				24	989			
Traitement	2	1 835	917	497	<0,0001	2	916	458	137	<0,0001
Erreur	8	15	2			22	73	3		

S.C.E. : somme des carrés d'écart; C.M. : carré moyen.

Tableau 20. Analyse de variance des courbes de la germination et de l'émergence en fonction du temps des graines d'épinette blanche traitées et non-traitées; les courbes ont été calculées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{Exp}(-C \text{Exp}(-\text{Jour } B))$.

Source	Germination					Emergence				
	d.l.	S.C.E.	C.M.	F	P	d.l.	S.C.E.	C.M.	F	P
Total	25	1 760				35	2 647			
Traitement	2	1 678	839	235	<0,0001	2	2 592	1 296	773	<0,0001
Erreur	23	82	4			33	55	2		

S.C.E. : somme des carrés d'écart; C.M. : carré moyen.

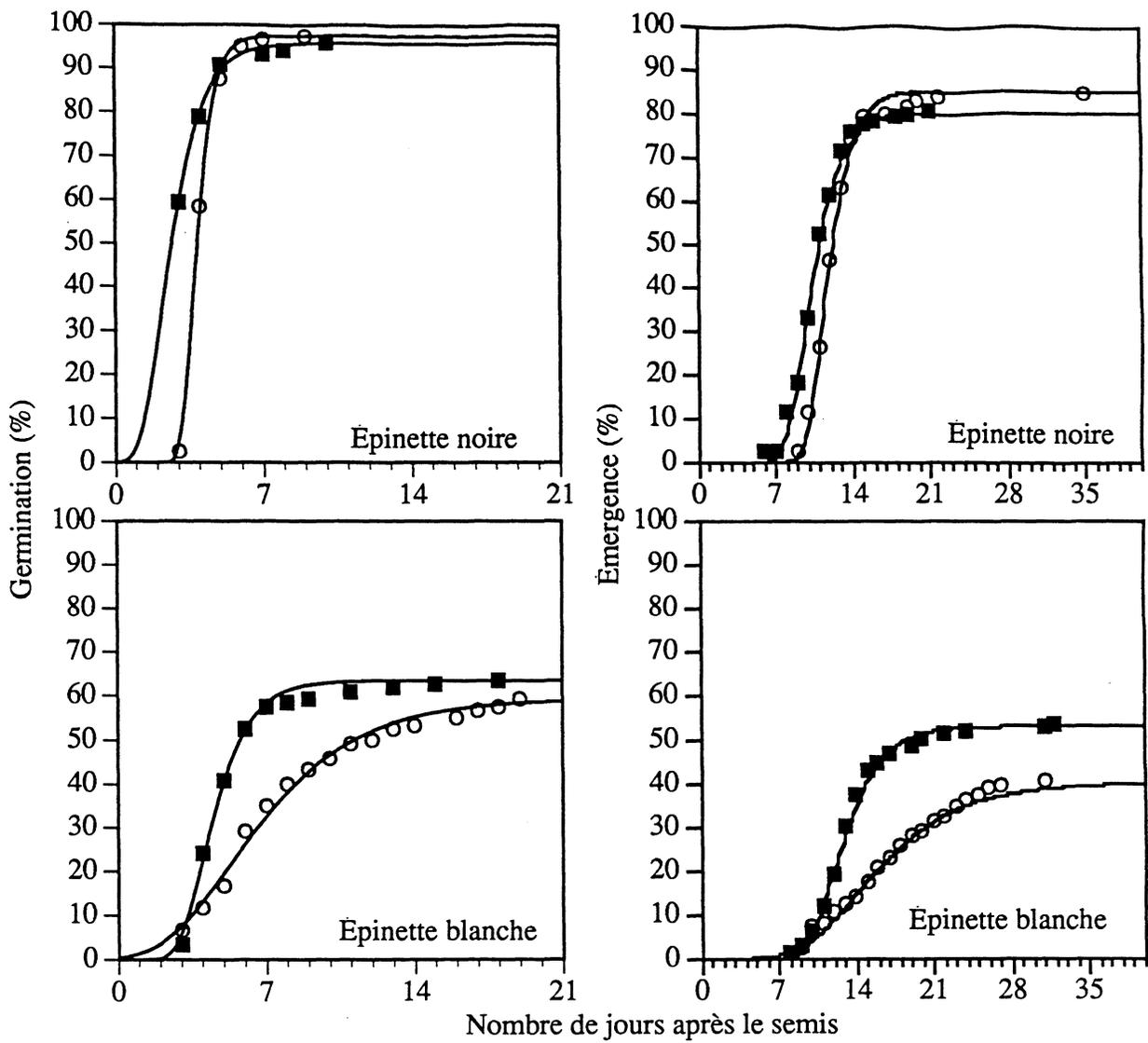


Fig. 15. Pourcentage de germination et d'émergence des graines d'épinette noire et d'épinette blanche traitées ■ et non-traitées ○. La fonction de Gompertz, $\%G = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$, a servi à tracer les courbes de régression.

Discussion

Les tests de germination sur les vingt lots d'épinette noire ont permis d'identifier la masse comme étant un facteur important influençant le potentiel de germination et d'émergence de cette espèce. La masse des graines d'épinette noire varie significativement entre les zones écologiques des peuplements d'origine. Les graines provenant de la zone boréale sont significativement plus légères que celles provenant des vergers à graines ou de la forêt mixte et il existe une corrélation significative entre la masse et la latitude (tableau 14). Nos résultats sont en accord avec Morgenstern (1969) qui montre une diminution latitudinale de la masses des graines d'épinette noire dans des peuplements de l'Ontario entre 42° et 60° de latitude nord. Les différences de masse des graines seraient reliées au climat et à la fertilité des sols des peuplement d'origine. Les peuplements situés dans les zones les plus froides produisent des graines dont la masse est en moyenne plus faible; le nombre de degrés-jours dans la sapinière à bouleau blanc (domaine 6) est de 1280-1440 mais seulement de 720-940 dans la pessière noire à sapin et mousse (domaine 11) (Thibault 1987). Mercier et Langlois (1992) ont trouvé les mêmes relations chez l'épinette blanche; la masse moyenne des graines d'épinette blanche provenant du nord du Québec est significativement plus faible que celle du sud et ces graines sont souvent disséminées avant la pleine maturation de l'embryon. Au Québec, les graines d'épinette blanche atteignent leur pleine maturité lorsque le nombre de degrés-jours accumulés atteint 1 276 (Mercier et Langlois 1993). La corrélation entre la maturité de l'embryon et le nombre de degrés-jours accumulés a aussi été observée chez plusieurs autres espèces de conifère (Edwards 1980). Les variations inter annuelles du nombre de degrés-jours accumulés expliquent les différences de qualité entre les années de récoltes des semences d'épinette blanche (Caron 1993).

Les graines d'épinette noire provenant des vergers à graines ne sont pas plus lourdes que celles des peuplements de la forêt mixte (tableau 3). Les variations entre les lots des vergers à graines sont probablement d'origine génétique puisque les conditions environnementales sont relativement

uniformes dans la région étudiée. Chez l'épinette noire, la grosseur des cônes varie d'un arbre à l'autre et le poids des graines est relié directement à la grosseur du cône (Haavisto et Skeates 1995a). Selon ces auteurs, la dimension des cônes et la masse des graines sont contrôlées génétiquement. Des variations significatives de la masse des graines ont été observées entre des clones d'épinette de Sitka; ces variations seraient sous contrôle génétique modéré puisqu'il existe aussi des variations significatives à l'intérieur des clones (Chaisurisri *et al.* 1992).

La longueur et la largeur des graines ne varient pas entre les différentes zones et domaines écologiques et les variations à l'intérieur de chaque domaine sont faibles (tableau 3). La longueur et la largeur sont pourtant fortement corrélés à la masse de la graine (tableau 14). La masse varie d'un facteur 4,6 tandis que la longueur et la largeur varient d'un facteur 2,4 et 2,1 respectivement (fig. 3, 6 et 9). L'examen des graines non-germées a montré qu'il n'y avait pas de graines vides. On peut donc déduire qu'il existe des différences de densité spécifique entre les provenances. La densité d'une semence est associée à la quantité des réserves stockées et des protéines des mitochondries; une plus grande quantité de protéines dans les grosses semences résulte en un taux de respiration plus élevé et une plus grande quantité d'énergie (ATP) est disponible au moment de la germination, donnant aux graines plus lourdes un potentiel de croissance supérieure (Copeland 1976). Chez l'épinette de Norvège, les concentrations en azote, en graisse, en sucres, en phosphore et en magnésium sont corrélées positivement au poids de 1 000 graines, indiquant que ces constituants se trouvent surtout dans l'endosperme et l'embryon (Pulliainen et Lajunen 1984).

Les courbes du pourcentage de germination et d'émergence des semis en fonction du temps des graines d'épinette noire ont été calculées pour chaque lot à l'aide de la fonction de Gompertz (fig. 1 et 2). Ce modèle s'est avéré plus flexible que le modèle de Weibull qui est suggéré par Bonner (1984).

Le pourcentage de germination mesurée en cabinet de croissance correspond à quelques pour-cent près au pourcentage de germination effectué par le Centre de semences forestières de Berthier en 1995 et 1996 (tableau 1 et 4). Les variations du taux de germination se retrouvent surtout dans les lots provenant de la pessière noire (fig. 1). La vitesse de germination et le pourcentage final sont nettement plus faibles pour les lots 13 et 14 et dans une moindre mesure pour le lot 15. La dormance des graines n'est pas en cause puisque moins de 2% des graines qui n'ont pas germées étaient viables d'après le test au sel de tétrazolium. Le faible taux de germination de ces lots peut s'expliquer par le vieillissement des graines puisque ces lots ont été récoltés en 1984 et 1986 (tableau 1). Cependant, les lots 18 et 19 provenant aussi de la pessière noire et qui ont été récoltés en 1984 ont quand même un taux de germination élevé. Les graines de ces lots étaient sans doute moins vigoureuses au moment de la récolte et l'entreposage durant une longue période n'a fait qu'amplifier le phénomène. L'*Association of Official Seed Analysis* définit la vigueur d'une graine comme étant << la propriété déterminant le potentiel de germination rapide et uniforme et le développement d'un semis normal dans de grandes variations de conditions environnementales >> (Bonner 1984).

Les graines d'épinette noire qui ont germées ont été transférées dans des récipients IPL-67 et cultivées par la suite dans une serre dans des conditions semblables à une production commerciale. En général, le pourcentage de germination en serre est plus faible que celui qui est mesuré en cabinet de croissance (Arp *et al.* 1989). Le pourcentage d'émergence des lots provenant des vergers à graines et de la forêt mixte est inférieur de 13% au pourcentage de germination initial et le taux de survie des semis après 38 jours ne dépasse pas 88% (tableau 4). La vitesse d'émergence et le pourcentage de survie des semis des lots provenant de la sapinière et de la pessière sont très inférieurs à ceux des lots précédents (tableau 4; fig. 2). Ces différences sont encore plus marquées pour les lots provenant de la pessière notamment pour les lots 13, 14, 15 et 18 où le pourcentage final d'émergence ne dépasse pas 56% (tableau 4). Le faible pourcentage de survie est relié à la germination initiale mais aussi à la vitesse d'émergence du

semis qui est beaucoup plus lente pour ces lots (fig. 2). Les différences de masse et des dimensions des graines entre les lots expliquent, du moins en partie, les différences de germination et de survie des semis.

Au moment de l'émergence de la racicule, celle-ci-perçoit la gravité et courbe vers le bas. L'orientation de la racine lors du transfert dans les récipients ne semble pas la cause de la diminution de l'émergence puisque seulement trois graines ont montré un géotropisme inverse, soit l'émergence de la racine au dessus de la silice. Malek (1992) a observé qu'environ 1% des graines d'épinette noire prégermées avaient une croissance agiotropique lorsqu'elles étaient transférées dans les récipients.

La période s'écoulant entre la rupture du tégument par la racicule et l'allongement de l'hypocotyle et des cotylédons au dessus de la silice est donc la plus critique pour la survie du semis. L'embryon n'est pas autosuffisant avant l'élongation des cotylédons et le début de la photosynthèse. La croissance de l'hypocotyle qui doit se frayer un chemin à travers la silice demande de l'énergie. Durant cette période, les réserves accumulées soutiennent la croissance et le développement de l'embryon. Par exemple, le poids sec du mégagamétophyte des graines de pin Ponderosa décroît rapidement durant la germination (Kramer et Kozlowski 1979). La vitesse de germination est donc un facteur clé puisque les réserves peuvent s'épuiser avant le développement complet du semis. La vitesse d'émergence des semis est d'ailleurs proportionnelle au pourcentage final de survie (fig. 2). Chez l'épinette noire, le nombre de cotylédons et la longueur de hypocotyle sont corrélés avec le poids de la graine (Morgenstern 1969). Chez le pin lobllolly (*Pinus taeda*) les graines les plus lourdes ont un hypocotyle plus long et germent plus rapidement (Dunlap et Barnett 1983). Un hypocotyle plus long est avantageux puisqu'il permet au semis d'émerger rapidement de la silice et d'être autotrophe.

Les régressions linéaires montrent que le nombre de jours de la germination et de l'émergence décroît significativement en fonction de la masse de la graine (tableau 5). Cependant, ces différences sont peu importantes au point de vue opérationnel puisqu'elles signifient une différence de quelques jours dans un calendrier de production de semis en serre qui s'étend sur plusieurs mois.

La masse est un meilleur critère que la longueur et la largeur pour différencier les graines d'épinette noire en fonction de leur pouvoir germinatif et d'émergence (fig. 5). Ces résultats sont en accord avec Skeates et Haavisto (1995b) dont les études en serres indiquent qu'il est préférable de séparer les graines d'épinette noire sur la base du poids plutôt que la dimension ou la densité. Wang *et al.* (1994) ont montré aussi que les graines d'épinette noires les plus lourdes ont un meilleur taux de survie et produisent des semis plus grands comparativement aux graines plus légères.

À peine 32% des graines dont la masse est inférieure à 0,800 mg (classe 1) ont produit un semis viable. Le faible potentiel germinatif est relié principalement à la vitesse d'émergence qui est beaucoup plus lente par rapport aux graines plus lourdes. Les pourcentages finaux de germination et d'émergence augmentent en fonction de la masse de la graine et les écarts sont plus importants dans le cas de l'émergence, ce qui confirme que les réserves emmagasinées dans la graine et possiblement la taille de l'embryon sont des facteurs importants. Les écarts entre les taux de germination et d'émergence des différentes classes de longueur et de largeur sont moins marqués par rapport à la masse (fig. 8 et 11).

En utilisant que 24% des graines, soit celles dont la masse est supérieure à 1,3 mg, on peut espérer un gain de 14% dans l'émergence des semis pour l'ensemble des populations étudiées (tableau 15). Cependant, les résultats sont très variables en fonction de la provenance. Le tri des graines en fonction de la masse n'augmente que de façon marginale le taux de germination et

d'émergence des populations dont le potentiel de germination est élevé au départ. Par contre, le triage des graines provenant de la sapinière à bouleau blanc (domaine 8) permettrait d'espérer un taux d'occupation des alvéoles de 95%.

Le moyen pratique le plus simple pour séparer les graines en fonction de leur dimension est le tamisage. Dans cette expérience cependant, l'élimination des plus petites graines par tamisage n'améliore pas ou très peu le taux de germination ou d'émergence des semis (tableau 16). Le tamisage sépare les graines en fonction de la largeur, lequel varie peu dans le cas des graines d'épinette noire.

Pour que le semis d'une seule graine par alvéole soit économiquement réalisable, un taux d'émergence d'au moins 98% est nécessaire (Gohier 1992). Nos résultats montrent cependant que la sélection des graines en fonction de la masse ou de la dimension des graines ne permet pas d'atteindre cet objectif. De plus, les résultats sont très variables entre les provenances. La sélection des graines en fonction de la masse implique que le nombre de graines rejetées avant le semis augmente en fonction de la latitude du peuplement d'origine puisque la proportion de grosse graine est plus faible dans les provenances nordiques. Le tri des graines d'épinette noire peut se justifier pour certaines provenances puisqu'il permettrait de diminuer le nombre de graines semées par alvéole et réduire le coût de l'éclaircie. Les graines dont la masse est inférieure à 0,800 mg devraient être éliminées au moment du traitement des graines puisque leur potentiel germinatif est faible.

La sélection des graines en fonction de leur masse peut avoir un impact négatif sur la diversité génétique des nouveaux peuplements puisque les arbres produisant des graines plus légères risquent de ne pas être sélectionnés. Chez l'épinette blanche, la sélection des 17% des graines les plus lourdes signifie que seulement 44% des arbres d'un échantillon sont représentés (Hellum 1976). Le tri des graines en fonction de la masse peut signifier une érosion génétique

automatique des populations de cette espèce. Cependant, cette sélection s'exerce sans doute déjà lorsque plusieurs graines sont semées par alvéole puisque les graines plus légères germent plus lentement et sont probablement éliminées lors de l'éclaircie. En fait, la vitesse de germination, l'éclaircie et l'élimination des semis qui n'atteignent pas les critères de classification sont la cause principale de la sélection génétique chez le sapin Douglas (El-Kassaby et Thompson 1996). Ces auteurs recommandent d'ailleurs le semis d'une seule graine par alvéole ou l'utilisation d'une seule famille pour les graines provenant des vergers à graines pour assurer la diversité génétique. Chez l'épinette noire, certains arbres produisent plus de gros cônes que d'autre et les gros cônes contiennent un plus grand nombre de graines qui sont aussi plus lourdes que la moyenne (Haavisto et Skeates 1995a). Ceci à des implications opérationnelles puisqu'il est possible d'éliminer les plus petites graines au moment de la récoltes des cônes en ne sélectionnant que les plus gros cônes ou en effectuant le tri par tamisage dans les installation de traitement des semences. Le poids des graines peut aussi être augmenté par des traitements cultureux des vergers à graines (Sorensen et Campbell 1985; Skeates et Haavisto 1995a).

En plus d'augmenter le potentiel de germination, le tri en fonction de la masse de la graine peut avoir comme conséquence la production de semis de plus grande taille. La taille et la biomasse des semis d'épinette noire sont corrélées au poids de la graine même après 25 semaines de croissance (Skeates et Haavisto 1995b). Chez l'épinette Sitka, les différences de dimension des semis sont significatives mais pas assez importantes d'un point de vue opérationnel; les effets clonaux sont dominants et comptent beaucoup plus dans l'uniformité de la germination (Chaisurisri *et al.* 1992). Chez le mélèze du Japon (*Larix leptolepis* [Sieb et Zucc.] Gordon) une forte corrélation est observée entre la vitesse de germination, le poids des graines et le poids des semis après 35 jours de croissance (Logan 1980).

Cependant, le poids de la graine n'est pas un bon critère de sélection d'arbres supérieurs au point de vue génétique puisque que l'effet du poids de la graine n'est que transitif et s'estompe après

quelques années de croissance. Chez le pin d'Écosse (*Pinus sylvestris* L.) les effets du poids de la graine sur la hauteur des semis sont plus marqués chez les semis d'un an et diminuent ou disparaissent vers l'âge de 5 à 7 ans chez les population d'Europe centrale et méridional, mais demeurent stables pendant ce temps chez les populations nordiques (Reich *et al.* 1994). La disparition graduelle dans le temps, sauf pour les populations nordiques, suggère que l'effet maternel peut masquer les variations génétiques existantes reliées au potentiel de croissance entre les populations durant les premières années de croissance. L'effet du poids de la graine sur la croissance ultérieure des semis peut avoir des effets au point de vue opérationnel puisque la sélection des plus grosses graines réduirait la période de croissance et les coûts de production en serre. De plus, des semis de plus grande taille auraient plus de chance de survivre lorsque la compétition est importante sur les sites de plantation. Nos études à L'U.Q.A.C. se poursuivent d'ailleurs pour déterminer l'effet de la dimension de la graine sur la taille et la biomasse des semis produits en serre en tenant compte de la provenance des lots de graines.

Il est donc évident qu'une sélection des graines en fonction de la masse, de la longueur ou de la largeur ne permettrait pas d'améliorer suffisamment le taux d'occupation des alvéoles des récipients pour permettre au producteur de ne semer qu'une graine par alvéole. Cette sélection améliore cependant le taux final de germination et d'émergence.

Le traitement d'amorçage a augmenté la vitesse de germination des graines d'épinette noire et d'épinette blanche (fig. 14). Cependant, ce traitement n'a pas amélioré le taux d'émergence final des graines d'épinette noire tandis qu'il a augmenté significativement pour l'épinette blanche, soit de 40 à 53%. Dans le cas de l'épinette noire, la totalité des graines qui n'ont pas germées étaient non-viables d'après le test au sel de tétrazolium. Pour l'épinette blanche, le pourcentage de graines viables mais qui ne germaient pas était de 20% lorsque que les graines n'étaient pas traitées mais diminuait à 5% pour les graines traitées. Le traitement par amorçage des graines a donc eu un effet significatif sur la levée de la dormance des graines d'épinette blanche.

L'envigoration des graines de pin blanc associée à la stratification à froid permet de briser la dormance des graines, ce qui augmente le taux de germination (Downie et Bergsten 1991a). Cependant les graines traitées se conservent moins longtemps puisque nous avons remarqué le développement de moisissures après quelques mois de conservation à 5° C.

SECTION II : TRAITEMENTS DES SEMENCES QUI AUGMENTENT LE TAUX DE GERMINATION

Introduction

En agronomie, les producteurs de semences commerciales voient de plus en plus le prétraitement des semences comme un bon moyen d'augmenter la valeur des lots de graines (Taylor et Harman 1990). Ces traitements peuvent être physiques comme l'enrobage des graines qui améliore la précision du semis soit physiologiques comme le conditionnement osmotique qui augmente la vigueur de la semence et la vitesse de germination dans des conditions défavorables au point de vue température ou relation hydrique. Cependant, certains traitements qui ont d'excellentes performances biologiques ne sont pas profitables au point de vue économique lorsque l'amélioration de la qualité de la semence ne justifie pas le coût du traitement en regard de la valeur commerciale des semences. Aussi, plusieurs traitements efficaces chez certaines espèces donnent de piètre résultats chez d'autres.

Traitements chimiques des semences

Des composés chimiques naturels comme les acides humiques, foliques et fulviques sont des biostimulants de la croissance des plantes et ont été utilisés pour stimuler la germination des graines de carottes (Sanders *et al.* 1990). Le biostimulant Egostim (Montedison, New York) est composé d'acide folique et de cystéine. Les produits Agro-Lig et Enersol (American Colloid Co., Skokie, Ill.) contiennent des acides humiques fabriquées à partir de la Léonardite, une substance organique extraite au Dakota du Nord. Ces composés stimulent la croissance en augmentant l'absorption du fer par les racines. Les acides humiques forment des complexes avec les métaux et les oxydes hydriques augmentant la disponibilité des nutriments et possiblement le mouvement des ions métalliques à l'intérieur de la plante. Utilisées dans la culture des carottes, ils

n'augmentent pas le taux de germination initial mais l'émergence hors du sol. L'Ergostim (Montedison, New York) stimule l'allongement du radicule lorsque les graines sont pré germées avant le semis.

Les traitements chimiques sont surtout utilisées pour lever la dormance des graines. Les produits utilisés peuvent être des oxydants (hypochlorite, peroxyde) ou des régulateurs de croissance (gibbérellines, cytokinines, éthylène) (Bewley et Black 1985). Les graines qui requièrent un traitement de stratification à froid répondent positivement à ces substances qui en plus accélèrent la vitesse de germination.

Chez *Picea glehnii* Master, la gibbérelline A3 (GA3) à 50 ppm, l'éthrel (un composé qui se dégrade en éthylène) entre 1-100 ppm augmente le taux de germination des graines qui ont été entreposé plus de 10 ans (Shibakusa 1980). Par contre, une cytokinine comme le 6-benzyladénine inhibe fortement la germination. La stratification à froid couplée à certaines traitements chimiques augmentent la germination chez le pin blanc de l'ouest (*Pinus monticola* Dougl.) (Pitel et Wang 1985). La germination est plus rapide et le taux de germination plus élevé, passant de 74 à 83% lorsque les graines sont traitées à la kinétine et à l'acide gibbérellique suivie d'un trempage dans le peroxyde avant d'être statifiées pendant 42 jours.

Des expérience de germination en laboratoire montrent que des graines d'épinette noire pré-traitées dans des solutions contenant des micronutriments comme CuSO_4 , ZnSO_4 , MnSO_4 et H_3BO_4 germent plus rapidement (Adams 1995).

L'enrobage et l'encapsulation des graines

Dans son sens le plus large, l'enrobage est un procédé qui permet d'appliquer un matériel inerte ou biologique sur une semences. L'enrobage est utilisé pour distribuer des agents actifs biologiques

qui sont directement en contact avec la graine sans modifier la forme ou les dimensions des semences. Ces agents peuvent être des fongicides, des éléments minéraux ou des micro-organismes bénéfiques (Taylor et Harman 1990). De nouveaux produits ont aussi été développés pour améliorer la résistance des graines lorsqu'elles sont semées dans des conditions hydriques stressantes. Un polymère hydrophile H-SPAN (Hydrolized starch-graft-polyarylonitrile) permet de maintenir un potentiel hydrique élevé autour de la graine au moment de la germination. Des enrobages de polymères ont aussi été développés pour retarder l'imbibition lorsque les graines sont semées dans des sols humides. L'enrobage dans le CaO_2 permet d'augmenter l'oxygénation des graines dans des conditions anoxiques.

L'encapsulation des graines est utilisée pour modifier le poids et les dimensions de la graine ce qui augmente la précision des semoirs lorsqu'une seule graine est semée à la fois et que la forme des graines est variable (Kaufman 1991). La technologie est la même que celle utilisée par l'industrie pharmaceutique dans la fabrication des pilules (Taylor et Harman 1990). Le matériel d'enrobage peut être du carbonate de calcium, du calcaire, du gypse, du talc, de la vermiculite, de la poudre de diatomée, du kaolin de la bentonite, de la zéolite ou de la tourbe qui sont mélangés avec un liant qui durcit l'extérieur de l'enrobage. Des recherches ont été entreprises au Centre de Foresterie des Grands Lacs du Service Canadien des Forêts pour évaluer l'enrobage des graines l'épinette noire par des procédés commerciaux déjà disponibles sur le marché (Adams 1995). L'enrobage des graines par les firmes commerciales P. Trussels et OSECA Inc. ont été évalués. Trussels produit des graines enrobées soit dans la silice (320 mesh) ou de la poudre de diatomée combinée à un liant d'alcool polyvinyle. OSECO Inc. produit des graines enrobées selon un procédé breveté Prill-On[®] qui augmente le poids des graines de 30 à 50% et la formulation comprend des inoculants, des fertilisants, de la chaux et des additifs spéciaux. Les essais en ensemencement direct du Centre de Foresterie des Grands Lacs montrent que l'enrobage n'a pas d'effet sur la vitesse de germination des graines d'épinette noire lorsque l'épaisseur de l'enrobage ne dépasse pas 2,25 mm.

L'encapsulation dans de l'alginate est aussi utilisée pour la production de semence artificielle d'embryon somatique (Repunte *et al.* 1995). Cependant la production de semence artificielle n'est pas encore opérationnelle. Chez l'épinette noire, la possibilité de produire des embryons somatiques est très variables selon les familles et le taux de survie est faible (Adams *et al.* 1994). De plus l'encapsulation des embryons d'épinette noire somatiques réduit le taux de germination des semences artificielles qui sont conservées à 4° C (Lulsdorf *et al.* 1993). Les techniques existantes de production de semences artificielles par l'encapsulation d'embryons somatiques dans un gel d'alginate utilisées chez les espèces horticoles donnent de piètre résultats chez les épinettes (Tremblay 1992).

L'amorçage des graines par osmoconditionnement

L'imposition d'un stress hydrique au moment de la germination empêche l'émergence de la racine mais n'a pas d'effet sur les autres processus de la germination tel que la mobilisation des réserves, la synthèse et l'accumulation des ARN et la formation des enzymes (Adams 1995). Le contenu en ATP est plus élevé dans les graines de pin gris osmoconditionnées (Bourgeois et Malek 1991). Les réponses physiologiques et biochimiques ne sont pas encore bien comprises mais il semble que l'élongation de la racine est plus sensible au stress hydrique que l'élongation ultérieure des racines; ainsi, l'émergence de la racine peut être bloquée à un potentiel hydrique moins négatif que pour une racine déjà émergée (Bewley et Black 1985)

Ce processus physiologique est donc utilisé pour déclencher la germination tout en empêchant l'émergence de la racine, augmenter la vitesse de la germination et la vigueur des graines qui sont semées dans des conditions environnementales défavorables. L'avantage de cette technique est que les graines conditionnées peuvent être manipulées comme n'importe quelles autres graines et être entreposées pendant une certaine période avant le semis. Des graines d'épinette noire pré

conditionnées osmotiquement ont été conservées à 0,5° C et une humidité réduite (6%) pendant 56 jours tout en conservant leur viabilité et les avantages du conditionnement (Fleming et Lister 1984).

Les graines sont conditionnées dans un environnement contrôlé qui permet de régulariser le potentiel hydrique de l'agent osmotique, l'aération et la température (Taylor et Harman 1990). L'agent osmotique le plus souvent utilisé est le polyéthylène glycol (PEG) de poids moléculaire élevé (MW 6000-8000). Le PEG est non-toxique et ne pénètre pas les parois cellulaires. Des agents osmotiques de faible poids moléculaire comme des sels minéraux (MgSO₄, KNO₃) et des sucres inertes (mannitol) ont aussi été utilisés (Bewley et Black 1985). Les graines sont placées sur des papiers absorbants de type Kimpack imbibés de la solution osmotique (Fleming et Lister 1984) ou bien dans des réservoirs (Akers et Holley 1986). Le traitement des graines placées sur un matériel absorbant limite la quantité de graines qui peuvent être traitées à la fois et demande plus d'espace. Le système SPS (Seed Priming System) mis au point par Akers et Holley (1986) permet de traiter jusqu'à 900 g de semences végétales à la fois. Il consiste en des cylindres en PVC remplis de la solution osmotique et des semences qui sont aérées continuellement par une pompe à air. Les cylindres sont placés dans un aquarium où l'eau est chauffée, permettant de maintenir la température du système uniforme. Des systèmes semblables ont été mis au point qui permettent de traiter 40 000 graines d'épinette noire à la fois (Adams 1995). Des procédés utilisant des matériaux solides ont aussi été mis au point et ont l'avantage de ne pas avoir besoin d'oxygénation. Le procédé SMP (Solid Matrix Priming) utilise un matériel solide comme des argiles mélangées dans une proportion connue avec de l'eau (Taylor et Harman 1990). La vermiculite est aussi utilisée dans le conditionnement osmotique; un potentiel osmotique de -1,4 MPa peut être obtenu en mélangeant une quantité égale en poids de vermiculite et d'eau et un potentiel hydrique de -1,5 MPa dans une proportion 2 : 1 (Pill *et al.* 1994).

La durée du traitement dépend du potentiel hydrique de la solution et de la température. La majorité des graines sont traitées dans des solutions dont le potentiel hydrique varie entre -0,5 et

-2,0 Mpa et à des température de 10 à 30° C (Taylor et Harman 1990). L'osmoconditionnement des graines de persil (*Petroselinum crispum* L.) pendant 3 semaines dans une solution de PEG de -1,2 MPa à 15° C augmente la vitesse de germination et le rendement de la récolte (Pill 1986). L'osmoconditionnement est aussi utilisé chez l'ail dont le taux de germination est fortement réduit à des températures qui dépasse 25° C (Parera et Cantliffe 1992).

Le conditionnement des graines d'épinette noire à -1,25 MPa à 20° C pendant 14 jours augmente la vitesse et l'uniformité de la germination de même que la vigueur des graines (Fleming et Lister 1984). Le conditionnement n'augmente pas le taux final de la germination; les lots de graines utilisées par Fleming et Lister (1986) avait déjà un taux de germination très élevé au départ (> 95%). Le traitement osmotique est bénéfique à l'épinette noire surtout lorsque la germination a lieu à des températures froides comme c'est le cas dans l'ensemencement direct en forêt (Adams 1995). Cependant, les résultats de Malek (1992) montrent que le pré conditionnement des graines d'épinette noire dans différentes concentrations de solutions de PEG 8000 n'apporte pas de bénéfice au point de vue de la germination, que les solutions de K_3PO_4 et de KNO_3 tuent les graines après 3 jours et que les graines peuvent être préconditionnées pendant 6 jours uniquement dans de l'eau aérée sans agent osmotique; les essais en serre montrent que la durée de la production est réduite d'une semaine mais le taux d'émergence n'est pas influencé puisque les lots de graines utilisées avait un pourcentage élevé avant le traitement (98%). Le traitement de prégermination des graines de *Pinus taeda* dans de l'eau aérée réduit la durée de la germination et augmente le taux de germination quotidien (Boyer *et al.* 1988). Dans le cas du pin gris, les graines osmoconditionnées germent plus rapidement mais le pourcentage final de germination n'augmente pas (Bourgeois et Malek 1991).

La revigoration des graines

La technique de revigoration a été développée pour augmenter la germination des graines qui sont en dormance; elle consiste à contrôler le contenu en eau des graines qui sont stratifiées à froid (Downie et Bergsten 1991a). Les graines sont placées dans un cylindre de Plexiglas dont les deux extrémités sont munies de membrane en Gore-Tex®. Les membranes permettent les échanges de vapeur d'eau et d'air mais retiennent l'eau à l'intérieur du tube. Une quantité précise d'eau est ajoutée à l'intérieur du tube correspondant à 30% du contenu en eau des graines. Le tube est incubé à 5° C sous une humidité relative de 95% empêchant l'évaporation de l'eau à l'intérieur du tube. Le tube est roulé une fois par jour pour mélanger les graines. Les graines sont semées après 4 semaines. L'eau est absorbée par les graines en 2-3 jours laissant la surface des graines sèche.

Les résultats de Downie *et al.* (1993) montrent que le conditionnement osmotique au PEG n'affecte pas le pourcentage final de germination de l'épinette blanche, augmente ou n'affecte pas le temps moyen de la germination, diminue ou n'affecte pas l'uniformité de la germination. Par contre, le traitement de revigoration à 30% du contenu en eau de la graine s'est montré supérieur pour l'épinette blanche, l'épinette noire et le pin gris. Les graines envigorées à 30% germent plus rapidement mais le traitement n'affecte ni le taux final de germination ni l'uniformité de la germination. En moyenne, le temps moyen pour germer diminue de 0,13 jour par jour de traitement pour l'épinette blanche, 0,23 pour l'épinette noire et cette relation est linéaire jusqu'à 20 jours de traitement. Pour le pin gris, le temps de germination diminue de 0,1 jour par jour de traitement pouvant aller jusqu'à 14 jours. La technique de revigoration des graines demande moins de travail que le conditionnement osmotique au PEG, n'a pas d'effet toxique sur les graines et la surface des graines est sèche après 2 jours ce qui facilite leur manipulation lors du semis.

La technique IDS

Les graines pleines mais non-viables (possédant un mégagamétophyte et un embryon mort) sont présentes dans les lots de graines et ne peuvent être séparées des graines viables d'après un critère physique puisque les graines mortes ne se différencient pas des graines viables par leur masse, leur dimension, leur couleur (Downie et Bergsten 1991b). La variation de la teneur en eau au cours de germination peut être mis à profit pour séparer les graines viables des graines pleines mais où l'embryon est mort. La méthode IDS (I = incubation, D = dessiccation, S = séparation) mise au point en Suède pour trier les graines forestières est une méthode biologique basée sur le principe que la vitesse d'évaporation de l'eau diffère entre les graines mortes et les graines viables lorsque les graines sont séchées après l'incubation dans l'eau (Bonner 1984). Durant le séchage, les graines vivantes perdent l'eau absorbée durant l'incubation plus lentement que la graine morte causant une différence mesurable de la densité. Cette différence persiste durant une période relativement longue de séchage. La séparation peut être faite par des jets d'air, sur une table vibrante, dans une colonne d'eau ou par des méthodes électrostatiques.

Downie et Wang (1992) ont utilisés la technique IDS pour séparer les graines viables et non-viables d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss), de pin tordu (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm.) et de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.). Les graines sont incubées à 20° C durant 3 jours sur des tissus imbibés d'eau. Les graines sont déshydratées partiellement en les plaçant sur un moustiquaire dans un conditionneur de graines à 20° C et une humidité relative entre 75 et 85% pendant 2 heures jusqu'à ce que l'extérieur des graines soit sèche. Lorsque la surface des graines est sèche, elles sont séchées sous un jet d'air à 20° C pendant 7 à 12 heures. La durée de la dessiccation partielle dépend de l'espèce et peut varier d'un lot de graine à l'autre. Lorsque la teneur en eau atteint 8-15%, les graines sont placées dans un tube en Perpex rempli d'eau. Les graines qui flottent en surface sont considérées non-viables. La séparation des fractions viables et

non-viables est optimale lorsque la séparation a lieu au moment où le contenu en eau des graines non-viables diverge le plus de celui des graines viables.

Les résultats de Simak (1981) montrent que l'élimination de 27% de graines de *Pinus contorta* par la technique IDS augmente le taux de germination de 67 à 90% et les graines traitées germent plus rapidement. La germination de la fraction viable peut difficilement être augmentée puisque celle-ci contient des graines endommagées mécaniquement qui germent mais ne donnent pas de semis viables. Les graines traitées peuvent être emmagasinées un maximum de 4 jours à basse température.

La séparation des graines mortes par la méthode IDS a amélioré de façon significative le pourcentage de germination de 50,2% à 86,0% dans le cas de l'épinette blanche et de 46,2% à 69,0% dans le cas du pin blanc dans les lots dont le taux de germination était le plus faible (Downie et Bergsten 1991b). Cette méthode permettrait le semis d'une seule graine par alvéole dans le cas des lots graines d'épinette blanche dont le taux de germination initial est élevé (94,5%) puisqu'après la séparation des graines par la technique IDS, le taux de germination atteint 99,5%.

La technique IDS peut avoir des résultats variables en fonction de l'espèce et des provenances. La technique IDS augmente d'une façon importante le taux de germination de quatre lots de semences sur cinq de pin tordu, de trois lots sur quatre de pin gris et deux lots sur cinq d'épinette blanche (Downie et Wang 1992). Les résultats décevants dans le cas de l'épinette blanche viennent du fait qu'un pourcentage élevé de graines viables flottait à la surface de la colonne de séparation. Le resséchage à 5% d'humidité résulte en une diminution significative de la germination et donc les graines séparées ne peuvent être conservées longtemps.

Certaines graines non-viables tombent au fond de la colonne de séparation avec la fraction de graines viables. L'utilisation d'une solution concentrée en sucre et donc plus dense permettrait une

meilleure séparation des fractions de graines viables et non-viables (Downie et Wang 1992). La conductivité électrique est différente entre les graines mortes et les graines viables et leur séparation par une technique basée sur un principe électrostatique est aussi possible. Les membranes cellulaires des graines mortes ou détériorées sont souvent endommagées et laissent filtrer un exsudat composé de sel minéraux, d'acides aminés et de sucres dont la conductivité électrique peut être mesurée (Copeland 1976). La conductivité électrique et la quantité d'hydrates de carbone dans les exsudats étaient respectivement 4-8 fois et 10-15 fois plus élevées pour les graines de pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) qui ne germent pas comparativement aux graines qui germent (Sahlen et Gjelsvik 1993). Les séparateurs de graines électrostatiques qui ont été développés utilisent les différences de propriétés électriques naturelles ou induites chez les graines pour séparer les graines viables et non-viables. Les graines se déplacent sur un convoyeur métallique chargé positivement qui est placé près d'une électrode chargée négativement. Les graines chargées positivement sont attirées par l'électrode et leur trajectoire est déviée de telle façon qu'elles tombent à côté du collecteur de graine. Les graines chargées négativement adhèrent au convoyeur et sont récupérées par des brosses lorsqu'elles sont en bas (Copeland 1976).

D'après Tillman-Sutela et Kauppi (1995), l'ouverture du micropyle au moment de l'imbibition expliquerait que la méthode IDS ne permet pas toujours la séparation des graines viables et non-viables. Chez l'épinette de Norvège (*Picea abies* (L.) Karst.), le micropyle s'ouvre après 24 heures d'imbibition. L'entrée de l'eau dans la graine est interrompue lorsque l'extrémité de la radicule qui est couverte de cires et de cristaux bouche le micropyle. La manière dont le micropyle s'ouvre explique qu'il n'est pas toujours possible de différencier les graines viables et non viables par leur densité.

Le semis de graines prégermées

Pour être certain qu'une graine germe, la meilleure manière de procéder est de ne semer que les graines déjà germées dans un incubateur. Un autre avantage de la pré-germination en incubateur est le fait que les conditions environnementales sont plus faciles à contrôler, ce qui se traduit par une émergence plus rapide qui minimise les risques de maladie chez les jeunes semis (Gray 196). Le terme *fluid drilling* est souvent employé puisque les graines sont mélangées avant le semis à un gel qui protège les graines lors du semis et de l'émergence.

Un système intégré de graines pré-germées sur gel comprend (1) la germination des graines avant le semis, (2) la séparation des graines germées et non-germées, (3) la suspension des graines dans un gel, (4) le semis des graines (Gray 1986). Les graines sont mises à germer dans des colonnes en Perspex ou en verre remplies d'eau et qui sont continuellement aérées par des pompes à air. La germination est interrompue lorsque la taille de la radicule atteint une longueur optimale; lorsque les racines sont trop longues elles tendent à s'entremêler, elles sont très fragiles et risquent d'être endommagées lors du semis sur le lit de germination. Les graines germées ou non germées sont séparées par densité dans des solutions aqueuses de sucrose, de mannitol ou de PEG. Les graines germées sont mélangées à un gel puis semées par des semoirs spécialisés utilisant des pistons ou des pompes centrifuges (Grey 1986).

Cinq classes chimiques de gels sont généralement utilisées : des argiles minérales synthétiques, des polymères d'amidon-polyacrylonitrile, des polymères de cellulose, des polymères de polyacrylamide et des copolymères d'acrylate de potassium et d'acrylamide (Pill 1991). Les gels sont utilisés à des concentrations variant entre 1 et 3%. Le gel modifie le lit de germination de plusieurs cm autour de la graine et procure un meilleur contact entre la graine et le sol, il réduit aussi l'impédance mécanique puisqu'il empêche la formation de croûte à la surface du lit de germination.

Le semis de graines prégermées sur gel est surtout utilisé en champ pour les semences horticoles ou agronomiques et les graines sont semées en rang formant un ruban continue de gel. Le développement de nouveaux types de semoir permettant de semer une graine à la fois permettrait l'emploi de la pré germination sur gel dans les cultures en serre (Pill 1991). Des prototypes de semoirs de précision sont en développement (Jajari *et al.* 1994). Certain semoir commercialisé (Fluid Drilling Ltd.) sème une graine à la fois 97% du temps, deux graines 2 à 3% du temps aucune graine 1% du temps (Gray 1986). Ces semoirs sont limités par leur vitesse qui n'est que d'une graine par seconde. De plus, les coûts additionnels résultant de l'achat de semoirs spécialisés et du temps supplémentaires pour la préparation des graines ont limité jusqu'ici l'utilisation de cette technique (Taylor et Harman 1990).

L'émergence du poivron (*Capsicum annuum* L.) est plus rapide et les plants sont plus uniformes lorsqu'ils sont semés sur gel comparativement au semis direct (Schultheis et Cantliffe 1988; Schultheis *et al.* 1988). Par contre, pour le brocoli (Kahn et Motes 1988) et le chou-fleur (Kahn et Motes 1989), les bénéfices de cette technique ne sont pas suffisants pour justifier l'utilisation d'équipement spécialisés.

Une technique modifiée de pré-germination des graines a été adaptée à la foresterie en Afrique du Sud par Bryan's Machinery en collaboration avec Sappi Forests et permet le semis d'une seule graine par alvéole pour la production de semis d'*Eucalyptus grandis* (South et Young 1994). Les clés du succès de cette technique sont, (1) le calibrage des graines en fonction de leur masse et leur dimension ce qui permet une meilleur séparation des graines viables et non viables, (2) l'utilisation d'eau sans l'ajout de gel au moment du semis. Lorsque les graines sont bien calibrées, les graines pré-germées imbibées d'eau changent de dimension mais non de masse. Les graines germées ont une densité spécifique plus basse que les graines non-germées et leur séparation est possible dans une colonne d'eau dans laquelle on ajoute lentement une solution concentrée en sucre jusqu'à ce

que les graines imbibées flottent à la surface de la colonne où elles sont récupérées à l'aide d'une épuisette. La pré-germination doit être interrompue tout juste au moment où la radicule est prête à émerger à travers le tégument. Si la pré-germination est trop longue, la radicule est trop longue et les graines s'entremêlent et il devient impossible de semer une seule graine à la fois. Après la séparation, les graines germées sont placées dans un récipient peu profond rempli d'eau. Les graines sont aspirées sur la tête d'aiguilles spéciales reliées à un vacuum qui sont plongées dans l'eau. Un rinçage à l'eau est utilisé pour déloger les graines en trop. Le semoir Bryan's *miniseeder* est capable de semer entre 60 et 225 caissettes par heure (128 cavités) une rangée à la fois. Ce semoir est distribué au Canada par la firme INNO-TEC I.T.U. Inc. (Thunder Bay, Ontario). Le semis de graines germées a été expérimenté au Québec par la Pépinière Argenteuil inc. (Durocher 1992). La principale difficulté rencontrée est la mise au point d'un semoir spécialisé munie d'un senseur permettant de trier les graines germées et non-germées.

Discussion

Les traitements chimiques des semences ont surtout été utilisés chez les espèces horticoles et très peu de travaux ont été faits chez les espèces forestières. Le traitement chimique des semences forestières est surtout utilisé pour lever la dormance. La dormance des graines d'épinette noire n'étant pas un frein à la germination, ces traitements sont donc de peu d'utilité dans ce cas. L'encapsulation des graines d'épinette noire serait utile uniquement lorsqu'il est nécessaire d'améliorer le calibre des graines d'épinette noire lors d'un semis de grande précision puisque le poids et les dimensions des graines sont très variables chez cette espèce. Encore faut-il que le taux de germination des graines soit très élevé au départ lorsqu'une seule graine est semée par alvéole puisque ce traitement n'augmente pas en lui-même le taux final de germination. L'osmoconditionnement des graines est surtout utilisé pour augmenter la vigueur des lots de graines qui germent lentement sans vraiment affecter leur taux final de germination, du moins dans les conditions environnementales optimales que l'on retrouve en serre.

Seules la techniques IDS ou le semis de graines pré-germées permettent de séparer les lots de graines en fractions viable et non-viables et rend donc théoriquement possible la semis d'une seule graine d'épinette noire par alvéole. Les modalités d'application de la technique IDS doivent être adaptées cependant à chaque espèce et peuvent même variées d'un lot de graines à l'autres à chacune des trois étapes, soit à l'incubation, à la dessiccation et à la séparation. Des recherches seraient nécessaires pour voir si cette technique est applicable à l'épinette noire et qu'elle serait l'augmentation du potentiel de germination des graines traitées par cette méthode. La technique IDS est protégée par un brevet au Canada et aux États-Unis¹ (Downie et Bergsten 1991)

La méthode IDS ne sépare pas à cent pour-cent les graines viables et non-viables puisque les graines endommagées mécaniquement et qui ne donnent pas de semis viables ne sont pas séparées. C'est pourquoi en Suède, plusieurs méthodes de conditionnement et de séparation sont utilisés en même temps pour parvenir à améliorer le potentiel de germination des semences forestières (Bergsten 1993) :

- 1- Les graines endommagées mécaniquement sont séparées par la méthode PREVAC; une faible pression d'air négative est d'abord appliquée à des graines flottant sur l'eau et lorsque la pression est relâchée, les graines endommagées perdent leur flottabilité et sombrent au fond du récipient permettant leur séparation.
- 2- Les lots de graines dont le pourcentage de germination est faible (un forte proportion de graines mortes) mais dont la vitesse de germination est élevée sont séparées par la méthode IDS.
- 3- Les lots de graines ayant un pourcentage de germination élevé mais une vitesse de germination faible sont envigorées (30% en contenue en eau) pendant 1-3 semaines sans séparation ultérieure par la méthode IDS.

¹ Le brevet appartient à Björkemar Construction and Consulting (BCC) et le représentant canadien est BBC Silviculture Systems Inc., 789 Don Mills Rd., Suite 700, Toronto, Ont. M3C 3L6 (Downie et Bergsten 1991).

4- Les lots de graines qui ont un pourcentage et une vitesse de germination faibles sont d'abord envigorés pendant 1-3 semaines à un contenu en eau de 30% puis incubés dans l'eau à 5°C au moins 16 heures et ensuite séparés par la méthode IDS.

En 1990, environ trois tonnes de graines ont été conditionnées de cette manière à l'*Institute for Forest Tree Improvement* à Sâvar, Suède (Bergstern 1993).

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Nos résultats montrent que la masse des graines d'épinette noire influence d'une manière importante le taux de germination des graines et la survie des semis. La masse varie en fonction de la latitude des peuplements d'origine et les graines provenant de la forêt boréale sont plus légères comparativement aux graines provenant de la forêt mixte ou des vergers à graines. L'élimination des graines dont la masse est inférieure à 1,3 mg permettrait d'obtenir un taux d'occupation des alvéoles de 95% pour certaines provenances ce qui n'est pas suffisant cependant pour recommander le semis d'une seule graine par alvéole. La sélection des graines en fonction de la masse est une méthode limitée par le fait qu'elle ne permet pas de distinguer une graine morte d'une graine viable.

La technique IDS qui permet la séparation des graines viables et non-viables en fonction du changement de densité après incubation et dessiccation des graines semble la méthode la plus prometteuse pour augmenter le taux de germination. Cette technique a l'avantage d'être peu coûteuse puisque le matériel utilisé est simple. Elle peut être réalisée par le producteur lui-même juste avant le semis et les graines traitées peuvent être semées avec des semoirs conventionnels. De plus, la technique IDS a fait ses preuves en Suède où elle est utilisée à grande échelle.

La pré-germination des graines d'épinette noire nécessite l'emploi de semoirs adaptés à cette technique. Nos résultats montrent cependant que cette méthode pourrait être limitée par le fait qu'un certain nombre de graines germées ne parviennent pas à émerger au-dessus de la silice qui recouvre les alvéoles.

La séparation des graines par classe de masse reste qu'en même une technique d'appoint puisque les méthodes de séparations IDS ou du semis de graines germées ne sont souvent efficaces que lorsque les graines sont homogènes au point de vue de leur poids.

Suite à nos résultats, nous faisons les recommandations suivantes :

1- Les graines d'épinette noire devraient être séparées en fonction de leur masse plutôt qu'en fonction de leur dimension comme c'est le cas lors d'un tamisage puisque la masse reflète mieux le potentiel de germination et la vigueur des graines que la longueur ou la largeur.

2- L'élimination des graines les plus légères ne permet pas de semer une seule graine par alvéole et d'atteindre un taux d'occupation suffisant pour assurer une production rentable au point de vue commercial. Nous suggérons quand même l'élimination des graines les plus légères puisque leur potentiel de germination est trop faible. Certaines provenances bénéficieraient de cette sélection ce qui permettrait au moins de diminuer le nombre de graines semées par alvéole. Le coût de l'éclaircie pourrait ainsi être réduit même s'il n'est pas complètement éliminé. Cette opération devrait s'effectuer dans un centre de traitement de semence comme Berthier qui possède déjà l'équipement spécialisé. Les semences les plus légères pourraient être éliminées en même temps que les graines vides en utilisant un séparateur à gravité.

3- Aucune technique de conditionnement prise isolément ne permet la séparation à 100% des graines viables des graines non-viables. La solution réside plutôt dans l'intégration des différentes techniques de conditionnement et de séparation comme c'est le cas actuellement en Suède. Des efforts de recherches importants seraient cependant nécessaires pour adapter les techniques IDS et d'envigoration à l'épinette noire en tenant compte de la variabilité entre les différentes provenances.

4- La méthode du semis des graines germées est limitée par des raisons technologiques liées au développement de semoirs spécialisées permettant le semis unique et le tri simultané des graines germées et non-germées. Il ne faut pas non plus négliger le coût inhérent à l'achat de tel équipement par rapport aux gains espérés. De plus, nos résultats indiquent qu'une graine pré-germée ne donne pas nécessairement un semis viable.

5- Nos résultats montrent que le taux d'émergence des semis est significativement plus faible que le taux de germination initial. Il a été souvent dit dans le passé que les taux de germination plus

bas obtenus en serre comparativement aux test de germination en cabinet s'expliquaient par les conditions environnementales qui seraient moins bien contrôlées en serre qu'en cabinet. Nous croyons plutôt que ces écarts sont causés par la mortalité d'un certain nombre de semis qui ne parviennent pas à émerger de la silice. L'enfouissement occasionne un délai dans l'émergence de la graine comparativement au test de germination où la graine est déposée directement sur le substrat. Les graines moins vigoureuses, qui ont d'ailleurs une masse plus faible, épuisent leurs réserves avant l'élongation des cotylédons permettant au semis de devenir autotrophe. Les recherches ultérieures devraient donc être axées avant tout de ce côté puisque l'émergence d'une graine enfouie correspond à un stade critique de la germination; la mortalité des graines durant cette période semble être le facteur qui limite le plus le taux d'occupation des alvéoles. Ces études devraient porter sur les conditions environnementales favorisant l'émergence rapide du semis de même que la nature du matériel de recouvrement.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier messieurs Jacques Allaire, Daniel Gagnon et Charles Privé pour leur aide technique lors de la phase expérimentale et lors des échantillonnages. Nous remercions aussi Jean-Pierre Girard de ministère des Ressources Naturelles région 02 pour sa collaboration. La réalisation de ce travail a été permise grâce au support financier du ministère des Ressources Naturelles. Nous remercions également le Centre de semences forestières de Berthier qui a fourni gratuitement les semences utilisées dans cette expérience.

Références

- Adams, M.J. 1995. Seed treatments have potential for direct seeding. Can. For. Serv. Great Lakes For. Centre Tech. Note 34, Sault Ste. Marie, Ont.
- Adams, G.W., Doiron, M.G., Park, Y.S., Bonga, J.M. et Charest, P.J. 1994. Commercialization potential of somatic embryogenesis in black spruce tree improvement. For. Chron. 70: 593-598.
- Akers, S.W. et Holley, K.E. 1986. SPS: a system for priming seeds using aerated polyethylene glycol or salt solutions. Hortscience 21: 529-531.
- Arp, P.A., Harris, D. et Stinson, E.D. 1989. Enhancing the container-stock seedling efficiency in forest nurseries. For. Chron. 65: 423-430.
- Bergsten, U. 1993. Removal of dead-filled seeds and invigoration of viable seeds - a review of a seed conditioning concept used on conifers in Sweden. *Dans* Dormancy and barriers to germination. Proceedings of an international symposium of IUFRO Project Group P2.04-00 (Seed problems), Victoria, British Columbia, Canada, april 23-26, 1991. *Édité par* D.G.W. Edwards : 7-15.
- Bewley, J.D. et M. Black 1985. Seed physiology of development and germination. Plenum Press, New York.
- Bonner, F.T. 1984. Seedling physiology and reforestation success. Martinus Nijhoff, Dordrecht.
- Bourgeois, J. et Malek, L. 1991. Metabolic changes related to the acceleration of jack pine germination by osmotic priming. Tree Physiol. 8: 407-413.
- Boyer, J.N., South, D.B., France, R.C. et Sharp, D.J. 1988. Pregermination treatment hastens emergence of loblolly pine seedlings. Tree Planters' Notes 39: 36-38.
- Brault, N. 1996. Semence de qualité pour pépiniéristes avertis. Colloque sur l'effet de l'origine et de divers traitements des graines sur la qualité des plants en pépinières, 20 mars 1996, Sainte-Foy, Québec.
- Brault, N. et Campagna, J.-P. 1992. Le traitements des semences : de la cueillette au <<frigo>>. Compte rendus du colloque Les Semences Forestières, 12-13 février 1992, Sainte-Foy, Québec: 129-133.
- Carlson, L.W. 1981. Conseils pour la culture en récipients des semis de conifères dans les provinces des prairies, Can. For. Serv. Northern For. Res. Cent. Nor-X-214-F.
- Caron, G.E., Wang, B.S.P. et Schooley, H.O. 1993. Variation in *Picea glauca* seed germination associated with the year of cone collection. Can. J. Forest. Res. 23: 1306-1313.
- Chaisurisri, K., Edwards, D.G.W. et El-Kassaby, Y.A. 1992. Genetic control of seed size and germination in Sitka spruce. Silvae Genet. 41: 348-355.
- Copeland, L.O. 1976. Principles of seed sciences and technology. Burgess Publ. Co., Minneapolis, Minnesota.

- Downie, B. et Bergsten, U. 1991a. An invigoration regime for *Pinus strobus* seeds. *Can. J. For. Res.* 21: 1343-1348.
- Downie, B. et Bergsten, U. 1991b. Separating germinable and non-germinable seeds of eastern white pine (*Pinus strobus* L.) and white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) by the IDS technique. *For. Chron.* 67: 393-396.
- Downie, B. et Wang, B.S.P. 1992. Upgrading germinability and vigour of jack pine, lodgepole pine, and white spruce by the IDS technique. *Can. J. Forest. Res.* 22: 1124-1131.
- Downie, B., Bergsten, U., Wang, B.S.P. et Bewley, J.D. 1993. Conifer seed germination is faster after membrane tube invigoration than after prechilling or osmotic priming. *Seed Sci. Res.* 3: 259-270.
- Draper, N.R., et H. Smith. 1981. *Applied regression analysis*, Second Edition. John Wiley & Sons, New York.
- Dunlap, J.R. et Barnett, J.P. 1983. Influence of seed size on germination and early development of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) germinants. *Can. J. For. Res.* 13: 40-44.
- Edwards, D.G.W. 1980. Maturity and quality of tree seeds - a state-of-the-art review. *Seed Sci. & Technol.* 8: 625-657.
- El-Kassaby, Y.A. et Thompson, A.J. 1996. Parental rank changes associated with seed biology and nursery practices in Douglas-fir. *Forest Science* 42: 228-235.
- Fleming, R.L. et Lister, S.A. 1984. Stimulation of black spruce germination by osmotic priming: laboratory studies. *Can. For. Serv., Great Lakes Forest Res. Cent.*
- Goyer, R. 1992. Séparation de la semence viable et de la semence non viable. Un outil pour le pépiniériste. *Comptes rendus du Colloque Les Semences forestières, 12-13 février 1992, Sainte-Foy, Québec*: 159-163.
- Grabe, D.F. 1970. *Tetrazolium testing handbook for agricultural seeds*. The Tetrazolium Testing Committee of the Association of Official Seed Analysts.
- Gray, D. 1986. Fluid drilling of vegetable seeds. *Dans Horticultural Review Volume 3. Édité par J. Janick*. Avi Publ. Co., Inc., Westport, Connecticut: 1-27.
- Haavisto, V.F. et Skeates, D.A. 1995a. Larger black spruce cones produce more and heavier seeds, *Can. For. Serv. Great Lakes For. Centre Tech. Note No. 30, Sault Ste. Marie, Ont.*
- Haavisto, V.F. et Skeates, D.A. 1995b. Variability in black spruce cone and seed production. *Can. For. Serv. Great Lakes For. Centre Tech. Note No. 26, Sault Ste. Marie, Ont.*
- Hellum, A.K. 1976. Grading seed by weight in white spruce. *Tree Planters' Notes* 27: 16-23.
- Jajari, J., Upadhyaya, S.K., et Shafii, S. 1994. Development and field evaluation of a hydropneumatic planter for primed vegetable seeds. *Transaction of the ASAE* 37: 1069-1075.
- Kahn, B.A. et Motes, J.E. 1988. Comparison of fluid drilling with conventional planting methods for stand establishment and yield of spring and fall broccoli crops. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 113: 670-674.

- Kahn, B.A. et Motes, J.E. 1989. Comparison of fluid drilling with conventional planting methods for stand establishment and yield of spring and fall cauliflower crops. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114: 200-204.
- Kaufman, G. 1991. Seed coating: a tool for stand establishment; a stimulus to seed quality. *HortTechnology* Oct./Dec.: 98-102.
- Khalil, B.M.K. 1986. Variation in seed quality and some juvenile characters of white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss). *Silvae Genet.* 35: 78-85.
- Kramer, P.J. et Kozlowski, T.T. 1979. *Physiology of woody plants.* Academic Press, Inc. New York.
- Lamontagne, Y. 1983. Strategies for the production of improved seeds in Quebec. Proceedings of the nineteenth meeting of the Canadian Tree improvement Association: part 1. Toronto, Ontario, august 22-26 1983: 178-183.
- Lamontagne, Y. 1992. Vergers à graines de première génération et tests de descendance implantés au Québec pour les espèces résineuses. Bilan des réalisations. Ministère des forêts, Direction de la recherche.
- Leadem, C.L., Eremko, R.D. et Davis, I.H. 1990. Seed biology, collection and post-harvest handling. *Dans: Regenerating British Columbia's forests. Édité par D.P. Lavender, R. Parish, C.M. Johnson, G. Montgomery, A. Vyse, R.A. Willis et D. Winston.* University Of British Columbia Press, Vancouver :193-234.
- Logan, K.T. 1980. Effet du poids et de la vitesse de germination des graines sur la croissance initiale du mélèze du Japon. *Revue bimestrielle de recherches* 36: 17-18.
- Lulsdorf, M.M., Tautorius, T.E., Kikcio, S.I., Bethune, T.D. et Dunstan, D.I. 1993. Germination of encapsulated embryos of interior spruce (*Picea glauca engelmannii* Complex) And black spruce (*Picea mariana* Mill.). *Plant Cell Rep.* 12: 385-389.
- Malek, L. 1992. Priming black spruce seeds accelerates container stocking in techniculture single-seed sowing system. *Tree Planters' Notes* 43: 11-13.
- Mead, R. et Cornow, R.N. 1983. *Statistical methods in agriculture and experimental sciences.* Chapman and Hall, New York.
- Mercier, S. et Langlois, C.G. 1992. Indice de maturité et conservation en fonction de la période de récolte des semences d'épinette blanche du Québec. *Can. J. For. Res.* 22: 1516-1523.
- Mercier, S. et Langlois, C.G. 1993. Relationships between *Epilobium angustifolium* phenology and *Picea glauca* seed maturation. *Forest. Écol. Manage.* 59: 115-125.
- Morgenstern, E.K. 1969. Genetic variation in seedlings of *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. I. Correlation with ecological factors. *Silvae Genet.* 18: 151-161.
- Nyborg, E.O. et Shikaze, G. 1974. Development of high-capacity precision seeding, loading, and handling equipment for container nurseries. *Dans: Proceedings of the North American Containerized Forest Tree Seedling Symposium, Denver, Colorado, august 26-29, 1974. Édité par By R.W. Tinus, W.I. Stein et W.E. Balmer.* Great Plain Agricultural Council Publication No. 68 :146-157.

- Parera, C.A. et Cantliffe, D.J. 1992. Priming leek seed for improved germination and emergence at high temperature. *Hortscience* 27: 1077-1079.
- Pill, W.G. 1986. Parsley emergence and seedling growth from raw, osmoconditioned, and pregerminated seeds. *Hortscience* 21: 1134-1136.
- Pill, W.G. 1991. Advances in fluid drilling. *HortTechnology* Oct./Dec.: 59-65.
- Pill, W.G., Crossan, C.K., Frett, J.J. et Smith, W.G. 1994. Matric and osmotic priming of *Echinacea purpurea* (L.) Moench seeds. *Sci. Hort.* 59: 37-44.
- Pitel, J.A. et Wang, B.S.P. 1985. Physical and chemical treatments to improve laboratory germination of western white pine seeds. *Can. J. For. Res.* 15: 1187-1190.
- Potvin, C., Lechowicz, M.J., et S. Tardif. 1990. The statistical analysis of ecophysiological response curves obtained from experiments involving repeated measures. *Ecology* 71: 1389-1400.
- Pulliainen, E. et Lajunen, L.H.J. 1984. Chemical composition of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* seeds under subarctic conditions. *Can. J. For. Res.* 13: 214-217.
- Rainville, A., Mottet, M.-J., Périnet, P. et Mercier, S. 1996. Les vergers d'aujourd'hui et de demain : des graines de meilleur qualité pour le pépiniéristes. Colloque sur l'effet de l'origine et de divers traitements des graines sur la qualité des plants en pépinières, 20 mars 1996, Sainte-Foy, Québec.
- Reich, P.B., Oleksyn, J. et Tjoelker, M.G. 1994. Seed mass effects on germination and growth of diverse European Scots pine populations. *Can. J. For. Res.* 24: 306-320.
- Repunte, V.P., Taya, M. et Tone, S. 1995. Preparation of artificial seeds using cell aggregates from horseradish hairy roots encapsulated in alginate gel with paraffin coat. *J. Ferment. Bioeng.* 79: 83-86.
- Sahlen, K. et Gjelsvik, S. 1993. Determination of *pinus sylvestris* seed maturity using leachate conductivity measurements. *Can. J. For. Res.* 23: 864-870.
- Sanders, D.C., Ricotta, J.A. et Hodges, L. 1990. Improvement of carrot stands with plant biostimulants and fluid drilling. *Hortscience* 25: 181-183.
- Schultheis, J.R. et Cantliffe, D.J. 1988. Improvement of plant establishment in bell pepper with a gel mix planting medium. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 113: 546-552.
- Schultheis, J.R., Cantliffe, D.J., Bryan, H.H. and Stoffella, P.J. 1988. Planting methods to improve stand establishment, uniformity, and earliness to flower in Bell pepper. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 113: 331-335.
- Shibakusa, R. 1980. Effect Of GA₃, IAA, Ethrel, And BA on seed germination of *Picea glehnii* Masters. *J. Jpn. For. Soc.* 62: 440-443.
- Silc, T. et Winston, D.A. 1979. Recommendation for calibrating mechanical seeders. *Tree Planters' Notes* 30: 22-24.

- Simak, M. 1981. Bortsortening av mata-dott fro ur ett froparti (removal of filled-dead seeds from a seedlot). Sveriges Skogsvårdsbunds Tidskrift 5: 31-36.
- Skeates, D.A. et Haavisto, V.F. 1995a. Fertilization improves black spruce seed orchard cone production. Can. For. Serv. Great Lakes For. Centre Tech. Note No. 28, Sault Ste. Marie, Ont.
- Skeates, D.A. et Haavisto, V.F. 1995b. Heavier black spruce seeds produce more vigorous seedlings. Can. For. Serv. Great Lakes For. Centre Tech. Note No. 31, Sault Ste. Marie, Ont.
- Sokal, R. R. et Rohlf, F. J. 1981. Biometry, Second Edition. Freeman, New York.
- Sorensen, F.C. et Campbell, R.K. 1985. Effect of seed weight on height growth of Dougals-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *menziesii*) seedlings in a nursery. Can. J. For. Res. 15: 1109-1115.
- South, D.B. et Young, C. 1994. Germinant sowing in South Africa. Combined Proceedings International Plant Propagators' Society 44: 266-270.
- SYSTAT 1992. Statistics, Version 5.2 Edition, Evanston, Il: SYSTAT, Inc.
- Taylor, A.G. et Harman, G.E. 1990. Concepts and technologies of selected seed treatments. Ann. Rev. Phytopatol. 28: 321-339.
- Thibault, M. 1987. Les régions écologiques du Québec méridional. Deuxième approximation. Carte, Service de la recherche, ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec.
- Tillman-Sutela, E. et Kauppi, A. 1995. The significance of structure for imbibition in seeds of the Norway spruce, *Picea abies* (L.) Karst. Trees 9: 269-278.
- Tremblay, F.M. 1992. Des semences clonales par embryogenèse somatique. Un outil pour le pépiniériste. Comptes rendus du Colloque Les Semences forestières, 12-13 février 1992, Sainte-Foy, Québec: 195-201
- Wang, B.S.P. 1983. Overview of utilization of improved seed. Proceedings of the nineteenth meeting of the Canadian Tree improvement Association: part 1. Toronto, Ontario, august 22-26 1983: 193-200.
- Wang, Z.M. et MacDonald, S.E. 1992. Peatland and upland black spruce populations in Alberta, Canada: Isozyme variation and seed germination ecology. Silvae Genet. 41: 117-122.
- Wang, Z.M., Lechowicz, M.J. et Potvin, C. 1994. Early selection of black spruce seedlings and global change - which genotypes should we favor ? Ecol. Appl. 4: 604-616.

ANNEXE A

Paramètres décrivant les courbes de régression

Tableau A1. Paramètres décrivant les courbes du pourcentage de germination et d'émergence en fonction du temps des 20 lots de graines d'épinette noire; les courbes ont été calculées en utilisant la fonction de Gompertz ; % = $A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))$ *.

Zone	Domaine	Lot	Germination				Emergence			
			A	B†	C†	r ²	A	B†	C†	r ²
Verger	-	1	95	2,27 (0,04)	2 276 (352)	> 0,99	83	0,70 (0,03)	1 591 (512)	> 0,99
	-	2	99	2,27 (0,10)	2 495 (866)	> 0,99	87	0,58 (0,03)	518 (204)	> 0,99
	-	3	95	2,45 (0,04)	3 119 (362)	> 0,99	83	0,62 (0,04)	505 (236)	> 0,99
	-	4	98	2,32 (0,07)	3 097 (822)	> 0,99	87	0,66 (0,04)	1 089 (536)	> 0,99
Mixte	6	8	98	1,80 (0,09)	712 (258)	> 0,99	85	0,66 (0,03)	1 573 (531)	> 0,99
	6	9	96	2,02 (0,01)	1 558 (41)	> 0,99	84	0,77 (0,05)	6 486 (3 894)	> 0,99
	6	16	99	2,66 (0,18)	20 845 (15 173)	> 0,99	88	0,78 (0,04)	7 021 (3 604)	> 0,99
Boréale	8	5	97	1,73 (0,08)	746 (229)	> 0,99	82	0,73 (0,05)	2 867 (1531)	> 0,99
	8	12	91	1,77 (0,04)	868 (126)	> 0,99	73	0,53 (0,02)	359 (75)	> 0,99
	9	6	94	1,82 (0,06)	929 (212)	> 0,99	69	0,48 (0,01)	317 (32)	> 0,99
	9	7	97	1,49 (0,02)	216 (15)	> 0,99	71	0,62 (0,02)	1 207 (346)	> 0,99
	11	10	85	1,26 (0,07)	156 (48)	> 0,99	58	0,60 (0,02)	949 (265)	> 0,99
	11	13	55	0,68 (0,04)	30 (6)	> 0,99	29	0,40 (0,01)	168 (31)	> 0,99
	11	14	61	1,00 (0,04)	131 (26)	> 0,99	35	0,45 (0,03)	511 (214)	> 0,99
	11	17	87	1,44 (0,08)	280 (98)	> 0,99	63	0,51 (0,04)	381 (166)	> 0,99
	11	19	80	1,14 (0,17)	99 (75)	> 0,99	56	0,56 (0,02)	631 (130)	> 0,99
	11	20	86	1,55 (0,07)	337 (99)	> 0,99	67	0,57 (0,03)	602 (183)	> 0,99
	12	11	93	1,70 (0,13)	560 (286)	> 0,99	78	0,53 (0,02)	343 (92)	> 0,99
	12	15	83	0,84 (0,08)	51 (22)	> 0,99	50	0,45 (0,02)	325 (95)	> 0,99
	12	18	93	1,21 (0,06)	127 (34)	> 0,99	56	0,41 (0,02)	113 (33)	> 0,99

* : A pourcentage final; B taux de variation du pourcentage; C paramètre de la forme de la courbe.

† : estimation et erreur-type.

Tableau A2. Paramètres des équations linéaires du nombre de jours de la germination et de l'émergence en fonction de la masse des 20 lots de graines d'épinette noire. Les variables sont : Jour = nombre de jours de la germination ou de l'émergence; M = masse de la graine (mg).

Lot	Germination			Émergence		
	Équation	P	r ²	Équation	P	r ²
1	Jour = 4,37 - 0,15 M	0,52	0,06	Jour = 13,57 - 1,38 M	0,09	0,17
2	Jour = 4,61 - 0,28 M	0,32	0,09	Jour = 14,67 - 1,66 M	0,29	0,10
3	Jour = 4,18 - 0,09 M	0,80	0,02	Jour = 15,86 - 3,43 M	0,008	0,27
4	Jour = 4,98 - 0,55 M	0,07	0,17	Jour = 15,61 - 2,76 M	0,01	0,25
5	Jour = 5,25 - 0,37 M	0,42	0,08	Jour = 12,21 - 0,06 M	0,94	0,01
6	Jour = 5,48 - 0,85 M	0,22	0,02	Jour = 18,47 - 4,02 M	0,07	0,19
7	Jour = 5,79 - 1,11 M	0,008	0,25	Jour = 20,05 - 6,43 M	0,002	0,33
8	Jour = 4,82 - 0,22 M	0,49	0,07	Jour = 12,24 + 0,43 M	0,74	0,03
9	Jour = 3,85 - 0,46 M	0,15	0,14	Jour = 13,67 - 0,68 M	0,66	0,04
10	Jour = 6,64 - 1,25 M	0,06	0,19	Jour = 13,64 - 0,24 M	0,92	0,01
11	Jour = 3,98 + 0,61 M	0,22	0,12	Jour = 12,22 + 0,47 M	0,76	0,03
12	Jour = 4,19 + 0,47 M	0,37	0,09	Jour = 18,08 - 5,03 M	0,03	0,23
13	Jour = 7,58 - 1,08 M	0,51	0,08	Jour = 15,74 - 0,42 M	0,95	0,01
14	Jour = 5,16 + 0,81 M	0,38	0,11	Jour = 15,36 + 0,68 M	0,85	0,03
15	Jour = 4,88 + 1,10 M	0,32	0,10	Jour = 16,07 - 1,17 M	0,62	0,07
16	Jour = 4,88 - 0,36 M	0,14	0,14	Jour = 14,23 - 1,26 M	0,12	0,15
17	Jour = 6,43 - 1,47 M	0,04	0,20	Jour = 12,98 + 0,70 M	0,84	0,02
18	Jour = 5,06 + 0,09 M	0,90	0,01	Jour = 15,62 - 1,86 M	0,39	0,11
19	Jour = 6,07 - 0,72 M	0,44	0,08	Jour = 16,41 - 2,90 M	0,09	0,21
20	Jour = 4,84 - 0,13 M	0,82	0,02	Jour = 12,14 + 0,63 M	0,68	0,05
Total	Jour = 5,81 - 0,89 M	<0,0001	0,17	Jour = 15,82 - 2,39 M	<0,0001	0,17

Tableau A3. Paramètres des équations linéaires du nombre de jours de la germination et de l'émergence en fonction de la longueur des 20 lots de graines d'épinette noire. Les variables sont : Jour = nombre de jours de la germination ou de l'émergence; L = longueur de la graine (mm).

Lot	Germination			Emergence		
	Équation	P	r ²	Équation	P	r ²
1	Jour = 3,91 + 0,11 L	0,70	0,04	Jour = 15,11 - 1,33 L	0,17	0,14
2	Jour = 3,85 + 0,16 L	0,55	0,06	Jour = 11,88 + 0,25 L	0,86	0,02
3	Jour = 4,89 - 0,33 L	0,38	0,08	Jour = 15,86 - 0,67 L	0,23	0,12
4	Jour = 4,55 - 0,11 L	0,70	0,04	Jour = 16,09 - 1,58 L	0,11	0,16
5	Jour = 5,99 - 0,47 L	0,30	0,10	Jour = 12,86 - 0,28 L	0,71	0,04
6	Jour = 5,20 - 0,25 L	0,42	0,08	Jour = 14,31 - 0,04 L	0,98	0,01
7	Jour = 4,86 - 0,11 L	0,74	0,03	Jour = 16,87 - 1,59 L	0,35	0,10
8	Jour = 5,53 - 0,40 L	0,29	0,10	Jour = 9,26 + 1,41 L	0,39	0,09
9	Jour = 3,77 + 0,26 L	0,35	0,09	Jour = 12,58 + 0,10 L	0,94	0,01
10	Jour = 4,84 + 0,11 L	0,87	0,02	Jour = 4,18 + 3,62 L	0,11	0,19
11	Jour = 3,34 + 0,55 L	0,20	0,12	Jour = 10,42 + 0,99 L	0,44	0,08
12	Jour = 3,60 + 0,45 L	0,21	0,12	Jour = 13,78 - 0,33 L	0,83	0,02
13	Jour = 8,73 - 0,97 L	0,49	0,09	Jour = 14,99 + 0,14 L	0,97	0,01
14	Jour = 5,05 + 0,40 L	0,63	0,06	Jour = 10,44 + 2,48 L	0,50	0,11
15	Jour = 1,69 + 1,88 L	0,05	0,20	Jour = 17,04 - 0,97 L	0,66	0,06
16	Jour = 4,37 + 0,02 L	0,93	0,01	Jour = 14,90 - 0,88 L	0,21	0,12
17	Jour = 6,74 - 0,82 L	0,19	0,13	Jour = 6,41 + 3,20 L	0,24	0,14
18	Jour = 8,80 - 0,29 L	0,70	0,04	Jour = 16,73 - 12,33 L	0,55	0,07
19	Jour = 3,27 + 0,84 L	0,30	0,11	Jour = 15,08 - 0,79 L	0,59	0,07
20	Jour = 3,01 + 0,72 L	0,15	0,14	Jour = 5,71 + 3,01 L	0,03	0,23
Total	Jour = 6,11 - 0,55 L	<0,0001	0,11	Jour = 15,77 - 1,14 L	0,0005	0,09

Tableau A4. Paramètres des équations linéaires du nombre de jours de la germination et de l'émergence en fonction de la largeur des 20 lots de graines d'épinette noire. Les variables sont : Jour = nombre de jours de la germination ou de l'émergence; l = largeur de la graine (mm).

Lot	Germination			Emergence		
	Équation	P	r ²	Équation	P	r ²
1	Jour = 4,73 - 0,42 l	0,29	0,10	Jour = 14,96 - 2,41 l	0,09	0,17
2	Jour = 3,91 + 0,25 l	0,66	0,04	Jour = 14,48 - 1,49 l	0,65	0,05
3	Jour = 4,57 - 0,38 l	0,50	0,06	Jour = 18,07 - 4,90 l	0,03	0,22
4	Jour = 4,64 - 0,28 l	0,63	0,05	Jour = 17,24 - 3,94 l	0,06	0,19
5	Jour = 6,09 - 0,99 l	0,25	0,11	Jour = 11,70 + 0,32 l	0,83	0,02
6	Jour = 6,08 - 1,20 l	0,05	0,20	Jour = 22,54 - 6,67 l	0,09	0,19
7	Jour = 5,71 - 0,86 l	0,23	0,11	Jour = 25,06 - 9,25 l	0,006	0,29
8	Jour = 4,61 - 0,07 l	0,91	0,01	Jour = 16,67 - 2,82 l	0,24	0,12
9	Jour = 5,24 - 0,62 l	0,33	0,09	Jour = 18,14 - 3,96 l	0,18	0,13
10	Jour = 10,67 - 4,18 l	0,004	0,28	Jour = 16,01 - 1,20 l	0,67	0,05
11	Jour = 4,78 - 0,11 l	0,87	0,02	Jour = 9,73 + 2,30 l	0,27	0,12
12	Jour = 3,58 + 0,86 l	0,23	0,12	Jour = 24,22 - 8,87 l	0,004	0,30
13	Jour = 5,68 + 0,66 l	0,75	0,04	Jour = 9,62 + 4,56 l	0,57	0,10
14	Jour = 6,60 - 0,52 l	0,71	0,05	Jour = 12,79 + 2,66 l	0,61	0,08
15	Jour = 3,77 + 1,80 l	0,30	0,10	Jour = 13,34 + 1,14 l	0,77	0,04
16	Jour = 4,77 - 0,27 l	0,58	0,05	Jour = 17,03 - 3,38 l	0,04	0,20
17	Jour = 8,05 - 2,47 l	0,02	0,23	Jour = 21,50 - 5,98 l	0,23	0,14
18	Jour = 7,06 - 1,57 l	0,23	0,12	Jour = 23,00 - 7,49 l	0,05	0,24
19	Jour = 6,43 - 0,90 l	0,60	0,05	Jour = 20,05 - 5,34 l	0,13	0,19
20	Jour = 5,94 - 0,94 l	0,33	0,10	Jour = 12,57 + 0,23 l	0,93	0,01
Total	Jour = 6,24 - 1,13 l	<0,0001	0,11	Jour = 18,18 - 3,98 l	<0,0001	0,15

Tableau A5. Paramètres des courbes du pourcentage de germination et d'émergence en fonction du temps des 10 classes de masse; les courbes ont été calculées en utilisant la fonction de Gompertz ; % = A Exp(-C Exp(-Jour B))^{*}.

Classe	Germination				Emergence			
	A	B [†]	C [†]	r ²	A	B [†]	C [†]	r ²
1	79	1,06 (0,03)	102 (15)	> 0,99	32	0,40 (0,01)	172 (30)	> 0,99
2	83	1,22 (0,08)	136 (48)	> 0,99	55	0,46 (0,01)	233 (31)	> 0,99
3	84	1,45 (0,11)	303 (140)	> 0,99	60	0,46 (0,02)	204 (41)	> 0,99
4	88	1,45 (0,08)	235 (78)	> 0,99	68	0,55 (0,01)	479 (77)	> 0,99
5	90	1,73 (0,13)	557 (281)	> 0,99	74	0,59 (0,03)	703 (209)	> 0,99
6	92	1,44 (0,11)	207 (87)	> 0,99	74	0,59 (0,02)	647 (129)	> 0,99
7	96	1,59 (0,14)	335 (189)	> 0,99	82	0,61 (0,02)	930 (246)	> 0,99
8	92	1,99 (0,15)	1 101 (613)	> 0,99	81	0,70 (0,04)	1 815 (831)	> 0,99
9	96	1,58 (0,05)	312 (66)	> 0,99	90	0,60 (0,04)	660 (323)	> 0,99
10	91	1,84 (0,10)	680 (245)	> 0,99	90	0,50 (0,05)	222 (122)	> 0,99

* : A pourcentage final; B taux de variation du pourcentage; C paramètre de la forme de la courbe.

† : estimation et erreur-type.

Tableau A6. Paramètres des courbes du pourcentage de germination et d'émergence en fonction du temps des 10 classes de longueur; les courbes ont été calculées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))^*$.

Classe	Germination				Émergence			
	A	B†	C†	r ²	A	B†	C†	r ²
1	88	1,18 (0,05)	116 (27)	> 0,99	55	0,54 (0,02)	585 (120)	> 0,99
2	88	1,25 (0,09)	131 (50)	> 0,99	57	0,47 (0,01)	239 (35)	> 0,99
3	82	1,21 (0,06)	103 (26)	> 0,99	63	0,53 (0,02)	399 (98)	> 0,99
4	88	1,45 (0,11)	240 (106)	> 0,99	64	0,51 (0,02)	325 (77)	> 0,99
5	88	1,46 (0,12)	229 (105)	> 0,99	69	0,55 (0,03)	446 (135)	> 0,99
6	89	1,56 (0,08)	328 (101)	> 0,99	73	0,56 (0,02)	491 (130)	> 0,99
7	93	1,66 (0,11)	445 (196)	> 0,99	82	0,60 (0,02)	666 (156)	> 0,99
8	95	1,78 (0,13)	670 (339)	> 0,99	82	0,59 (0,02)	799 (194)	> 0,99
9	93	1,41 (0,15)	187 (107)	> 0,99	74	0,51 (0,01)	271 (47)	> 0,99
10	89	1,66 (0,07)	489 (132)	> 0,99	79	0,72 (0,04)	2 820 (1 424)	> 0,99

* : A pourcentage final; B taux de variation du pourcentage; C paramètre de la forme de la courbe.

† : estimation et erreur-type.

Tableau A7. Paramètres des courbes du pourcentage de germination et d'émergence en fonction du temps des 6 classes de largeur; les courbes ont été calculées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(-\text{Jour } B))^*$.

Classe	Germination				Émergence			
	A	B†	C†	r ²	A	B†	C†	r ²
1	87	1,15 (0,06)	104 (26)	> 0,99	54	0,43 (0,02)	160 (31)	> 0,99
2	86	1,49 (0,10)	257 (111)	> 0,99	63	0,49 (0,01)	258 (42)	> 0,99
3	89	1,49 (0,07)	276 (74)	> 0,99	71	0,56 (0,02)	506 (95)	> 0,99
4	92	1,55 (0,12)	284 (126)	> 0,99	78	0,62 (0,02)	881 (208)	> 0,99
5	90	1,62 (0,19)	349 (2,53)	> 0,99	76	0,69 (0,02)	1 727 (472)	> 0,99
6	89	1,39 (0,08)	157 (50)	> 0,99	76	0,59 (0,05)	712 (419)	> 0,99

* : A pourcentage final; B taux de variation du pourcentage; C paramètre de la forme de la courbe.

† : estimation et erreur-type.

Tableaux A8. Paramètres des courbes du pourcentage de germination et d'émergence en fonction du temps des graines d'épinette noire classées par fraction de tamis; les courbes ont été calculées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(\text{Jour } B))^*$.

Fraction	Germination				Émergence			
	A	B†	C†	r ²	A	B†	C†	r ²
1	86	1,30 (0,07)	172 (50)	0,99	59	0,46 (0,02)	228 (34)	0,99
2	90	1,55 (0,09)	306 (106)	0,99	74	0,60 (0,02)	720 (139)	0,99
3-4	91	1,52 (0,12)	230 (107)	0,99	79	0,56 (0,03)	447 (136)	0,99

* : A pourcentage final; B taux de variation du pourcentage; C paramètre de la forme de la courbe.

† : estimation et erreur-type.

Tableaux A9. Paramètres des courbes du pourcentage de germination et d'émergence en fonction du temps des graines d'épinette noire et d'épinette blanche traitées et non-traitées; les courbes ont été calculées en utilisant la fonction de Gompertz : $\% = A \text{ Exp}(-C \text{ Exp}(\text{Jour } B))$.*.

Esp.	Trait.	Germination				Émergence			
		A	B†	C†	r ²	A	B†	C†	r ²
EPn	oui	96	0.95 (0.08)	8 (2)	<0.99	80	0.56 (0.03)	230 (62)	>0.99
EPn	non	98	1,80 (0,09)	712 (258)	<0.99	85	0.66 (0.03)	1 573 (531)	>0.99
EPb	oui	63	0.83 (0.06)	29 (8)	<0.99	53	0.42 (0.02)	155 (42)	>0.99
EPb	non	59	0.31 (0.02)	5 (1)	<0.99	40	0.20 (0.01)	16 (2)	>0.99

* : A pourcentage final; B taux de variation du pourcentage; C paramètre de la forme de la courbe.

† : estimation et erreur-type.