



## État des connaissances et effets anticipés au Québec de la mise en terre tardive de plants forestiers résineux produits en récipients : revue de littérature et analyse

Daniel Dumais<sup>a</sup>, ing.f., M. Sc., Jacques Gravel<sup>b</sup>, ing.f., Étienne Boileau<sup>b</sup>, ing.f., Patrick Descôtes<sup>c</sup>, ing.f., Céline Georlette<sup>d</sup>, agr., Stéphanie Houde<sup>d</sup>, agr., M. Sc. et Marie-Eve Tremblay<sup>d</sup>, B. Sc.

### Résumé

Au Québec, il est recommandé que la mise en terre de plants résineux produits en récipients prenne fin à la fin d'août. Or, depuis quelques années, elle se termine en moyenne à la mi-septembre. Avec le besoin de remettre en production certains sites, la pénurie de main-d'œuvre et les changements climatiques, la possibilité de prolonger la mise en terre après la mi-septembre (mise en terre tardive) suscite de l'intérêt, mais aussi des inquiétudes. Bien que cette pratique ait été réalisée dans certaines régions du Québec, il n'existe pas ou que très peu d'études sur le sujet. La présente note vise donc à dresser l'état des connaissances scientifiques acquises ailleurs (dans d'autres pays nordiques), afin de faire ressortir les effets anticipés et les risques dans le contexte québécois.

L'exercice a permis de constater que la mise en terre tardive peut diminuer la survie des plants, leur durcissement au froid, leur croissance racinaire et aérienne et contribuer à leur soulèvement par le gel. En considérant la réalité québécoise (essences de reboisement, climat régional, pratiques culturelles, préparation du site et méthodes de mise en terre), le risque a été jugé **faible à modéré** pour la réduction de l'endurcissement et les dommages hivernaux, **modéré** pour la baisse de survie et la perte de croissance aérienne, **modéré à élevé** pour le soulèvement par le gel, et **élevé** pour la croissance racinaire insuffisante.

Ainsi, la mise en terre tardive est une option à utiliser avec discernement. Le cas échéant, des précautions devraient être prises pour minimiser les risques (p. ex., éviter cette pratique dans les endroits où peu de neige s'accumule ou avec peu de végétation). Certes, il y a un manque de connaissances à combler pour documenter les effets de la mise en terre tardive sur la survie et la performance des plants au Québec.

Mots-clés : croissance racinaire, écophysiologie, plantations forestières, reboisement, soulèvement par le gel, survie post-plantation

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts  
Direction de la recherche forestière  
2700, rue Einstein  
Québec (Québec) G1P 3W8  
Téléphone : 418 643-7994  
Télécopieur : 418 643-2165  
Courriel : [recherche.forestiery@mrnf.gouv.qc.ca](mailto:recherche.forestiery@mrnf.gouv.qc.ca)  
Site Web : [recherche.forestiery.gouvernementale](http://recherche.forestiery.gouvernementale)

### Abstract

*In Québec, it is recommended to stop planting container-grown conifer seedlings by late August. Yet, in recent years, planting has been prolonged, on average, until mid-September. With the need to bring certain sites back into production, labour shortages and climate change, late planting (i.e., the possibility of extending the planting period beyond mid-September) is attracting interest, but also arousing concern. Although this practice has been carried out in certain regions of Québec, there are few to no studies on the subject. The purpose of this research note is to present the state of scientific knowledge acquired elsewhere (in other Nordic countries), to highlight the anticipated effects and risks in this province's context.*

*The exercise revealed that late planting can reduce plant survival, cold hardening, root and aerial growth, as well as contribute to frost heave. Considering Québec's reality in terms of tree species, regional climate, cultural practices, site preparation and planting methods, the risk is judged to be **low to moderate** for reduced hardening and increased winter damage, **moderate** for survival decline and aerial growth loss, **moderate to high** for frost heaving and **high** for insufficient root growth.*

*Thus, late planting is an option that should be used with discretion. Where appropriate, precautions should be taken to minimize risks (e.g., avoid this practice in areas with little snow accumulation or vegetation). Admittedly, there is a lack of knowledge to document the effects of late planting on plant survival and performance in Québec.*

*Keywords: ecophysiology, forest plantations, frost heaving, post-planting survival, reforestation, root growth*

- a Correspondance : [daniel.dumais@mrnf.gouv.qc.ca](mailto:daniel.dumais@mrnf.gouv.qc.ca)  
b Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF);  
c Direction de la coordination opérationnelle, MRNF;  
d Direction de l'expertise et de la coordination, MRNF.

## 1. Introduction

Au Québec, les orientations sylvicoles actuelles recommandent que la mise en terre de plants forestiers résineux produits en récipients prenne fin au plus tard à la fin du mois d'août (Gravel et al. 2016a). Au-delà de cette date, il y a un risque que les plants ne soient pas en mesure de bien s'enraciner (Luoranen 2018, Luoranen et Rikala 2013), de s'acclimater et de s'endurcir au froid avant l'hiver (Hänninen et al. 2009, Luoranen et al. 2006), ce qui pourrait diminuer leur taux de survie, leurs performances physiologiques ainsi que leur croissance subséquente (Luoranen 2018, Luoranen et Rikala 2013). Or, les feux de forêt d'une ampleur historique qui ont sévi au Québec en 2023 accentueront la pression sur les activités de reboisement. Avec la pénurie de main-d'œuvre grandissante et les changements climatiques, cette situation crée un contexte particulier. Ainsi, la possibilité de prolonger la période de mise en terre au-delà de la mi-septembre (mise en terre tardive) suscite de l'intérêt. En même temps, cette piste de solution soulève beaucoup de questions et certaines inquiétudes. Dans un article professionnel analysant les résultats d'essais opérationnels de mise en terre à différents moments au cours de la saison de croissance, Grossnickle et MacDonald (2021) ont lancé le débat. En rapportant que pas moins du quart (25 %) des essais de mise en terre tardive analysés ont été un échec, ils ont mis en lumière le risque associé à cette pratique. Selon ces auteurs, le succès d'une mise en terre tardive dépend des conditions environnementales locales et des objectifs de la plantation. Nous verrons plus loin quelles sont les causes fréquentes et probables des échecs.

Bien que récemment, des plants forestiers aient été mis en terre après la mi-septembre dans certaines régions du Québec, il n'existe pas (ou que très peu) de données ou d'études scientifiques sur le sujet. Il faut donc user de prudence avant de recommander cette pratique, notamment dans les domaines bioclimatiques de la sapinière et ceux de la pessière, où sont mis en terre la majorité des plants résineux. Le texte qui suit vise donc à dresser l'état des connaissances scientifiques actuelles, acquises ailleurs (dans d'autres pays nordiques), et d'en faire une analyse critique. Notre but ultime est de faire ressortir les effets anticipés, de déterminer les risques et d'émettre des recommandations en ce qui a trait à la mise en terre tardive de plants résineux produits en récipients dans le contexte québécois.

## 2. Matériel et méthodes

Pour commencer notre recherche documentaire, nous avons consulté les références citées dans le travail de Grossnickle et MacDonald (2021), lequel a été le point de départ de notre réflexion. Ces premières références nous ont par la suite permis d'accéder à d'autres documents, de remonter dans le temps et de dresser la liste suivante de mots-clés ou d'expressions pertinentes (et leurs équivalents en anglais) : croissance des racines, racinaire ou radicaire (*root development, egress or elongation, root elongation or growth, root growth capacity or potential, root system development, elongation or growth*); date, moment, période ou saison de mise en terre ou de plantation (*extended planting period or season, planting date, planting period or season, planting time, spring- or summer-planted seedlings*); établissement des semis plantés (*field establishment, seedling establishment*); mise en terre ou plantation d'automne ou tardive (*autumn-, fall- or late-planted seedlings, autumn or fall planting, autumn- or fall-planting trials*); performance des semis plantés (*field or field seedling performance, post-planting performance*); profondeur de mise en terre ou de plantation (*planting depth*); semis nouvellement ou récemment plantés (*newly planted seedlings*); soulèvement par le gel des semis plantés (*frost or seedling frost heave, frost or seedling frost heaving*); qualité ou succès de la mise en terre ou de la plantation (*outplanting or planting success, outplanting or planting quality*); survie ou taux de survie des semis plantés (*seedling survival, survival rate*). Ces termes ont par la suite été utilisés pour réaliser une veille de littérature supplémentaire à l'aide des moteurs de recherche Google Scholar, ResearchGate et ISI Web of Science. Pour les aspects entourant l'écophysiologie post-plantation des plants résineux produits en récipients (p. ex., échanges gazeux, durcissement au froid, relations hydriques, stress de plantation), les références consultées et citées proviennent principalement de la banque de données documentaires régulièrement mise à jour par l'auteur principal de la présente note de recherche.

Il importe de mentionner qu'il existe des similitudes, et la plupart du temps, des disparités entre le contexte des études scientifiques disponibles dans la littérature (notamment quant aux essences, au climat, à la préparation du site, aux méthodes de mise en terre, etc.) et celui qui prévaut au Québec. Ainsi, il va sans dire que des résultats sur le sujet provenant du sud-ouest des États-Unis, du sud de l'Europe (p. ex., Sánchez-González et al. 2016,

Starkey *et al.* 2015, Winjum 1963) et ceux obtenus pour des plants à racines nues (p. ex., Arnott 1975) ou pour des essences feuillues (p. ex., Landhäusser *et al.* 2012) ne sont pas pertinents dans le présent exercice. En outre, nous n'avons généralement pas considéré les résultats de recherche n'ayant pas fait l'objet d'une révision par les pairs, même si leur sujet était pertinent. En effet, cette « littérature grise » peut semer un doute quant à la validité scientifique des résultats présentés.

La revue de littérature et l'analyse qui suivent sont donc principalement basées sur des études scientifiques publiées dans des revues avec comité de lecture et s'intéressant aux effets de la période de mise en terre de plants résineux produits en récipients, à des latitudes nordiques et sous des climats comparables à celui du territoire forestier du Québec. Toutefois, dans cette littérature, la période de mise en terre définie comme étant tardive ou automnale varie beaucoup (tableau 1).

Même si les études sélectionnées constituent une base assez solide, nous avons aussi considéré les aspects distinctifs du Québec pour prédire les effets anticipés et les risques de la mise en terre tardive (après la mi-septembre) dans la province (section 3.4). Le risque que chaque effet ou conséquence se produise a été défini selon une échelle à 3 niveaux : faible, modéré ou élevé. Un **risque faible** indique que l'événement a peu de chance de se produire, de sorte qu'on peut pratiquement l'ignorer. Un **risque modéré** indique que l'événement se produira dans certaines circonstances, ce qui commande donc la vigilance. Enfin, un **risque élevé** indique que l'événement a de fortes chances de se produire ou qu'il se produira dès que les conditions propices seront réunies. Ainsi, ce risque est à prendre au sérieux. Pour juger du risque, nous avons considéré les facteurs aggravants et les facteurs atténuants rapportés dans la littérature, de même que l'importance de ces facteurs au Québec. Lorsque la plupart des facteurs en cause étaient aggravants et connus pour le Québec, le risque a été jugé **élevé**. À l'opposé, lorsque plus de facteurs atténuants existaient sous nos conditions, le risque a été jugé **faible**. Dans les cas où les deux types de facteurs étaient présents dans des proportions similaires, le risque a été jugé **modéré**. Autrement, selon l'ampleur des deux types de facteurs, le risque pouvait varier de **faible à modéré**, ou de **modéré à élevé**.

### 3. Résultats et discussion : état des connaissances et effets anticipés

#### 3.1. Mise en terre tardive : où, quoi et pourquoi ?

D'entrée de jeu, mentionnons qu'aux latitudes nordiques et depuis des décennies, les plants forestiers résineux produits en récipients sont habituellement mis en terre d'avril à septembre, avec certains écarts ou certaines variantes entre les régions. Au Québec, la recommandation actuelle est de cesser la mise en terre à la fin du mois d'août (Gravel *et al.* 2016a). Dans l'Ouest canadien, l'opération se terminait habituellement entre le début et la mi-août (Grossnickle 2000, Grossnickle et Folk 2003, Krumlik 1984). Dans le nord-ouest des États-Unis, par exemple dans le nord de l'Idaho, les plants de douglas bleu (*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* (Beissn.) Franco), de pin argenté (*Pinus monticola* Douglas ex D. Don) et de pin ponderosa (*Pinus ponderosa* Douglas ex Lawson & Lawson) peuvent être plantés jusqu'au début de septembre, à condition que la teneur en eau du sol soit adéquate (Adams *et al.* 1991). En Europe, dans les pays scandinaves, on a longtemps privilégié de courtes fenêtres de mise en terre, d'abord pendant quelques semaines au printemps (avril à début juin), puis en fin d'été (mi-août à début septembre) (Helenius 2005, Nilsson *et al.* 2010). Or, depuis la dernière décennie, avec l'augmentation de la mécanisation des opérations dans cette région (Luoranen *et al.* 2018, Rantala *et al.* 2009) et les résultats probants de travaux de recherche (p. ex., Luoranen *et al.* 2005), la seconde période de mise en terre a été prolongée (Nilsson *et al.* 2010). Ainsi, en Finlande, l'épinette de Norvège (*Picea abies* (L.) Karst.) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) peuvent maintenant être plantés jusqu'à la fin septembre (Luoranen *et al.* 2006, Luoranen et Rikala 2013).

**Tableau 1.** Principales études scientifiques consultées et analysées dans le présent travail, visant à vérifier l'effet de la période de mise en terre sur la survie, la physiologie et la croissance subséquente de plants résineux produits en récipients, selon le pays d'origine et la fenêtre temporelle de mise en terre étudiée (P = printemps; E = été; A = automne; – = période sans mise en terre).

Étude	Pays (région, État ou province)	Espèces	Fenêtre de mise en terre étudiée (mois/semaine)																
			Mars				Avril												
			1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>	3 <sup>e</sup>	4 <sup>e</sup>	1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>	3 <sup>e</sup>	4 <sup>e</sup>									
Adams et al. (1991)	États-Unis (Idaho)	<i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Pinus monticola</i> , <i>Pinus ponderosa</i>																	
Alm (1983)	États-Unis (Minnesota)	<i>Picea glauca</i> , <i>Picea mariana</i>																	
Barzdajn (2010)	Pologne	<i>Pinus sylvestris</i>								P	–	–	–						
Cram et Thompson (1981)	Canada (Saskatchewan)	<i>Picea glauca</i> , <i>Picea pungens</i> , <i>Pinus sylvestris</i>																	
Folk et al. (1994)	Canada (C.-Britannique)	<i>Thuja plicata</i>	P	–	–	–													
Folk et al. (1996)	Canada (C.-Britannique)	<i>Chamaecyparis nootkatensis</i>									P	P	–						
Harayama et al. (2016)	Japon	<i>Larix kaempferi</i>																	
Luoranen (2018)	Finlande	<i>Picea abies</i> , <i>Pinus sylvestris</i>																	
Luoranen et al. (2005)	Finlande (centre)	<i>Picea abies</i>																	
Luoranen et al. (2006)	Finlande (centre)	<i>Picea abies</i>																	
Luoranen et al. (2011)	Finlande (centre)	<i>Picea abies</i>																	
Luoranen et al. (2018)	Finlande (centre et sud)	<i>Picea abies</i> , <i>Pinus sylvestris</i>																	
Luoranen et Rikala (2013)	Finlande (centre et nord)	<i>Pinus sylvestris</i>																	
Luoranen et Rikala (2015)	Finlande (centre)	<i>Picea abies</i>																	
Narimatsu et al. (2016)	Japon	<i>Larix kaempferi</i>																	
Pikkarainen et al. (2020)	Finlande (centre et sud)	<i>Picea abies</i> , <i>Pinus sylvestris</i>								P	P	P	P						
Repác et al. (2011)	Slovaquie	<i>Larix decidua</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Pinus sylvestris</i>																	P
Repác et al. (2021)	Slovaquie	<i>Picea abies</i> , <i>Pinus sylvestris</i>									P	P	–						
Sinclair et Boyd (1973)	États-Unis (Idaho)	<i>Larix occidentalis</i> , <i>Picea Engelmannii</i> , <i>Pseudotsuga menziesii</i>																	
Taylor et al. (2009)	États-Unis (Washington)	<i>Larix occidentalis</i> , <i>Pseudotsuga menziesii</i>																	
Wallertz et al. (2016)	Suède et Norvège	<i>Picea abies</i>																	

Fenêtre de mise en terre étudiée (mois/semaine)																													
Mai				Juin				Juillet				Août				Septembre				Octobre				Novembre					
1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>	3 <sup>e</sup>	4 <sup>e</sup>	1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>	3 <sup>e</sup>	4 <sup>e</sup>	1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>	3 <sup>e</sup>	4 <sup>e</sup>	1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>	3 <sup>e</sup>	4 <sup>e</sup>	1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>	3 <sup>e</sup>	4 <sup>e</sup>	1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>	3 <sup>e</sup>	4 <sup>e</sup>	1 <sup>re</sup>	2 <sup>e</sup>	3 <sup>e</sup>	4 <sup>e</sup>		
													E	-		E	-	E	-	A	-	A	-	A					
					P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A										
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A					
		P	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A	A														
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A	A											
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A	A											
P	P	P	P	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	E	-	-	-	A	A	-	A								
		P	P	P	P	E	E	E	E	-	-	-	E	-	E														
		P	P	-	-	-	-	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E										
P	P	P	P	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
								E	E	E	E	E	E	E	E	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	E	E	-	-	-	A													
P	P	P	P	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
P	P	P	P	P	P	P	P	E	E	E	E	E	E	E	E	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A	A					
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A	A					
		P	P	P	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A	A	-	A								
																		A	-	A	-	-	-	A					
P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	E	-	-	-	A	-	-	-	-	-	-	-	A	A				

La période de mise en terre de plants forestiers semble également se prolonger de plus en plus dans l'ouest de l'Amérique du Nord, comme en Colombie-Britannique et dans les États de Washington et de l'Oregon, de même qu'en Europe centrale (Grossnickle et Ivetić 2022, Repáč *et al.* 2017). En Slovaquie, les résultats encourageants de quelques études antérieures (Repáč *et al.* 2011, 2016) indiquent même que la mise en terre tardive pourrait être plus couramment utilisée dans ce pays. Toutefois, la qualité du travail lors de la mise en terre aurait une grande incidence sur le succès de ces plantations tardives (Krumlik 1984, Luoranen *et al.* 2018). Il n'en demeure pas moins qu'en zone nordique, on en connaît encore très peu sur les effets d'une telle prolongation de la période de mise en terre de plants résineux (Luoranen et Rikala 2013). En Europe centrale, il s'avère que dans bien des cas, ce sont des feuillus qui sont mis en terre tardivement, alors qu'on recommande que les résineux soient mis en terre au printemps (Kuneš *et al.* 2011). À l'opposé, d'après quelques recherches menées en Slovaquie, la mise en terre tardive de plants résineux peut réussir en certaines circonstances. Par exemple, Gubka (2001) a trouvé que des plants d'épinette de Norvège mis en terre en automne sur un site en altitude avaient mieux survécu que ceux mis en terre au printemps. En Scandinavie, des suivis récents ont permis de démontrer que la mise en terre en octobre peut être adéquate pour les plants d'épinette de Norvège (Luoranen 2018), mais pas nécessairement pour ceux de pin sylvestre (pour lesquels seulement 40 % des plantations effectuées durant cette période ont réussi; Pikkarainen *et al.* 2020).

Le fait que les plants soient en dormance et le risque moindre de dommages causés par la sécheresse ou les températures élevées peuvent faire penser que la mise en terre serait préférable en automne plutôt qu'en été (Harayama *et al.* 2016, Repáč *et al.* 2017, 2021). Plusieurs invoquent aussi des arguments relatifs à diverses contraintes opérationnelles, à l'efficacité et à la rentabilité (Luoranen et Rikala 2013, Luoranen 2018). Par exemple, dans le contexte où la plantation est de plus en plus mécanisée (notamment en Scandinavie), la période de mise en terre doit s'étirer autant que possible afin d'amortir rapidement le coût élevé des machines. D'un autre côté, l'inconvénient majeur de cette pratique demeure les conditions météorologiques défavorables et imprévisibles qui peuvent survenir à cette période de l'année et à l'hiver suivant (Repáč *et al.* 2017, Luoranen *et al.* 2018, 2022). D'ailleurs, sous l'effet des changements climatiques, le cours normal de l'automne et de l'hiver est de plus en

plus perturbé, laissant place à des fluctuations importantes des températures et du couvert de neige, de même qu'à des cycles de gel-dégel plus fréquents (Contosta *et al.* 2019, IPCC 2022, Pagter et Arora 2013, Venäläinen *et al.* 2020). En outre, la capacité des plants résineux à surmonter les stress abiotiques et biotiques est moindre lorsque la mise en terre a lieu tardivement (Luoranen *et al.* 2018, 2022, Wallertz *et al.* 2016).

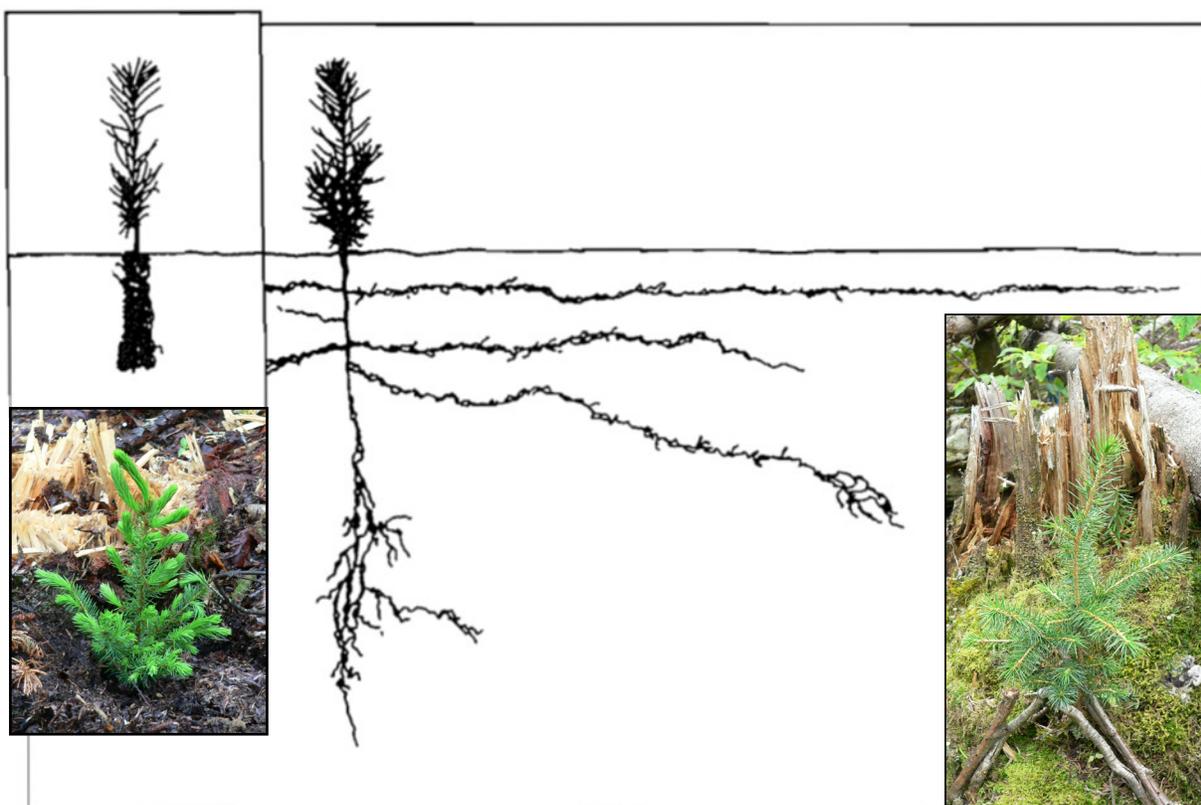
### 3.2. Écophysiologie des plants résineux après leur mise en terre

Avant de rapporter ce que la littérature scientifique démontre quant aux effets (ou les conséquences) de la période de mise en terre sur la performance des plants, il convient de dresser un bilan des connaissances sur l'écophysiologie de l'acclimatation et de la croissance initiale des plants résineux sur les sites de plantation. Cette étape apparaît essentielle pour bien comprendre les processus en cause (Colombo et Parker 1999, Kramer 1986, Margolis et Brand 1990) et saisir par la suite tout ce que peut impliquer le choix de la période de mise en terre.

Toute mise en terre engendre ce qu'on appelle un « choc » ou un « stress de plantation » (Burdett 1990, Close *et al.* 2005, Grossnickle 2005, 2018). La motte de racines du plant, d'abord en contact avec les parois du récipient, passe d'un milieu plutôt stable, tempéré et humide (habituellement irrigué jusqu'à la mise en terre), à un environnement plutôt variable (Burdett 1990, Grossnickle 2018). En effet, le sol du site de plantation peut être frais ou froid, notamment au printemps et à l'automne, ou très chaud, par exemple en plein mois de juillet ou lors de canicules. Certes, la température du sol influence beaucoup la physiologie et la croissance des racines (Alvarez-Uria et Körner 2007, Kul *et al.* 2020, Ritchie et Dunlap 1980). Les conditions d'humidité du sol du site de plantation peuvent aussi être très changeantes, voire extrêmes (Burdett 1990, Grossnickle 2018, Grossnickle et Ivetić 2022), selon la période de mise en terre et les caractéristiques du sol (p. ex., la texture, la quantité de matière organique). En fonction de ces caractéristiques et de la qualité du travail lors de la mise en terre, le contact entre la motte de racines et le sol environnant peut être déficient (Burdett 1990, Margolis et Brand 1990, Ritchie et Dunlap 1980). Ces conditions adverses créent un stress aux plants nouvellement mis en terre, dont l'accès optimal à l'eau et aux nutriments du sol dépend désormais de la croissance de nouvelles racines (Grossnickle 2005, 2012, Grossnickle et Ivetić 2022). Or, cette reprise de croissance racinaire peut prendre jusqu'à une dizaine

de jours, et ce, même dans les meilleures conditions de température et d'humidité du sol (Day et MacGillivray 1975). En effet, pour se développer, les racines du plant doivent s'ajuster aux contraintes physicochimiques de leur nouveau sol d'accueil (Kul *et al.* 2020). En comparaison, les biomasses aérienne et souterraine d'un plant résineux récemment mis en terre peuvent être similaires à celles d'un semis naturel d'âge et de taille comparables, mais les racines de ce dernier sont beaucoup plus étendues et profondes (figure 1; Balisky *et al.* 1995, Burdett 1990, Burdett *et al.* 1984). En outre, les bienfaits connus que procurent les champignons mycorhiziens colonisant le sol forestier, par exemple en facilitant l'accès à l'eau (Kropp et Langlois 1990, Policelli *et al.* 2020), ne se concrétisent pas encore pour le plant nouvellement mis en terre, dont la majeure partie des racines demeure confinée au trou de plantation (figure 1; Balisky *et al.* 1995,

Burdett 1990, Burdett *et al.* 1983). Dans cette situation, le risque est élevé que le plant perde plus d'eau que ce qu'il prélève par ses racines et qu'il s'expose ainsi à un stress hydrique (Bernier 1993, Kaushal et Aussenac 1989). D'ailleurs, la motte de racines, dont le substrat est principalement constitué de tourbe, représente elle-même un obstacle à l'hydratation des plants une fois ceux-ci mis en terre, si les conditions environnementales en provoquent le dessèchement (Örlander et Due 1986). Soulignons, à titre d'exemple, que la quantité d'eau contenue dans le feuillage d'un jeune plant résineux ne peut supporter que de quelques minutes à une heure la demande évaporative provenant de la transpiration (Jarvis 1975). Il est donc urgent que le plant récemment mis en terre mette en place de nouvelles racines en dehors de la motte de terre afin d'accéder plus facilement à l'eau contenue dans le sol environnant.

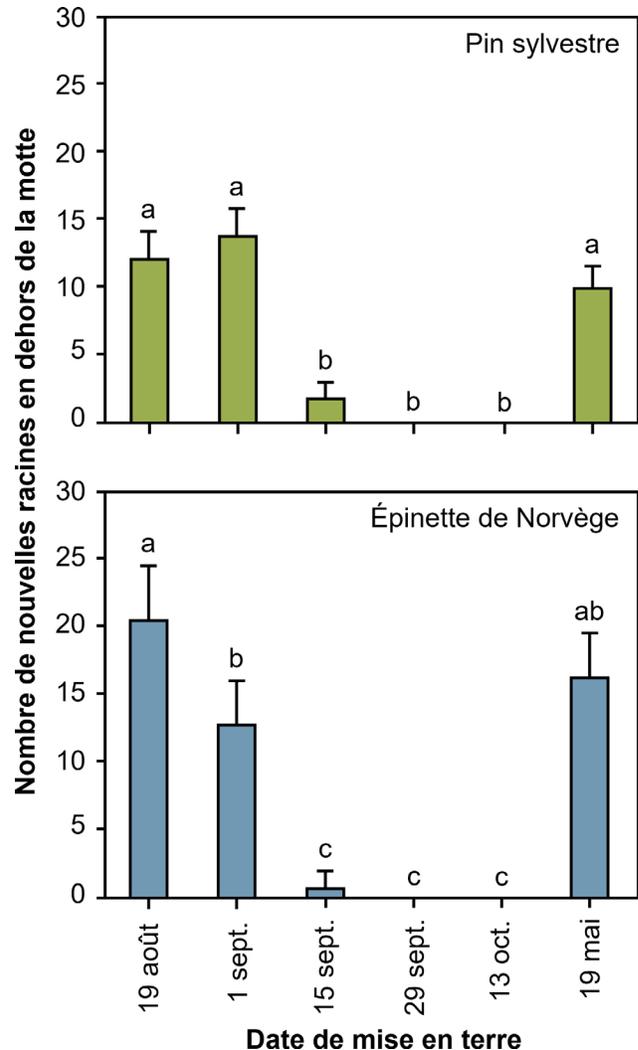


**Figure 1.** Illustration montrant comment l'étendue du système racinaire diffère entre un plant résineux produit en récipient nouvellement mis en terre (à gauche) et un semis résineux naturel (à droite), pour des biomasses aérienne et racinaire comparables (schéma adapté de Burdett 1990; Photos : Daniel Dumais).

La croissance des racines des essences résineuses boréales augmente rapidement lorsque la température du sol se situe entre 12 °C et 17 °C (Domisch et al. 2001, livonen et al. 1999), pour atteindre un optimum autour de 20 °C (Andersen et al. 1986, Lopushinsky et Max 1990, Vapaavuori et al. 1992). À l'opposé, elle diminue significativement lorsque la température du sol descend en dessous de 10 °C (Lopushinsky et Max 1990, Luoranen 2018, Niinemets 2010), pour finalement s'arrêter autour de 5-6 °C (Alvarez-Uria et Körner 2007, Grossnikle 2000, Vapaavuori et al. 1992). Ainsi, dans le sud de la Suède et de la Norvège, Wallertz et al. (2016) rapportent que la croissance racinaire de plants d'épinette de Norvège mis en terre en octobre avait déjà cessé. Luoranen (2018) et Luoranen et al. (2019) soulignent toutefois que le climat plus rigoureux de la Finlande écourte davantage la période de croissance des racines, et par le fait même, la possibilité de prolonger la période de mise en terre.

La date « butoir » pour cesser la mise en terre devrait donc logiquement varier en fonction de l'emplacement géographique du site de plantation (Krumlik 1984). Ainsi, au Québec, dans les domaines bioclimatiques de la sapinière et ceux de la pessière, la croissance racinaire des résineux décline vraisemblablement dès le début du mois de septembre et cesse après la mi-septembre (figure 2). Par conséquent, les plants mis en terre après cette date ne produisent pas (ou que très peu) de nouvelles racines hors de la motte de terreau (Luoranen 2018, Luoranen et al. 2006, 2018, 2019, Ritchie et Dunlap 1980). Cette croissance racinaire inexistante ou insuffisante peut retarder la croissance racinaire printanière l'année suivante (figure 3; Luoranen 2018). Dans une telle situation, les plants sont vulnérables à la sécheresse, notamment si celle-ci survient tôt dans la saison de croissance (Luoranen et al. 2023). Les sécheresses printanières risquent d'ailleurs d'être beaucoup plus fréquentes en raison des changements climatiques (Gera et al. 2019, IPCC 2022, Ruosteenoja et al. 2018).

Un aspect écophysiological fondamental connu depuis longtemps, et qu'il apparaît important de comprendre et de retenir, est que la croissance de nouvelles racines chez les jeunes plants résineux est fortement dépendante de la photosynthèse courante (Philipson 1988, Ritchie et Dunlap 1980, van den Driessche 1987), laquelle peut être faible en raison du stress de plantation (Grossnikle 1993, Guehl et al. 1989). En d'autres mots, le carbone servant à mettre en place de nouvelles racines ne provient pas (ou ne provient que très peu) des réserves contenues dans le plant (ramilles, tige et système racinaire existants), mais provient plutôt des produits



**Figure 2.** Résultats de l'étude de Luoranen (2018) réalisée en Finlande, montrant comment la date de mise en terre sur le site de plantation influence la croissance des racines de plants de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*: en haut) et d'épinette de Norvège (*Picea abies*: en bas) produits en récipients. La croissance racinaire a été évaluée 3 semaines après la mise en terre, en dénombrant les nouvelles racines qui émergent de la motte de terreau. Les barres d'erreur délimitent l'erreur type de la moyenne (n = 9). Les lettres au dessus de celles ci indiquent une différence significative ( $p < 0,05$ ) entre les différentes dates de mise en terre. Ainsi, sous les latitudes nordiques, on constate que la croissance racinaire des plants tend à s'arrêter vers la mi-septembre (adapté de Luoranen 2018).



**Figure 3.** Plant d'épinette noire mis en terre en forêt boréale québécoise après la mi-septembre 2017 et extrait du sol en juillet 2018 pour être observé. On peut constater qu'aucune nouvelle racine n'a été produite en dehors de la motte de terreau initialement mise en terre (Photo : Ministère des Ressources naturelles et des Forêts).

récents de la photosynthèse dans les aiguilles (Guehl *et al.* 1993, Puttonen 1986, van den Driessche 1987). Néanmoins, les réserves carbonées peuvent parfois contribuer à la production de nouvelles racines (davantage chez les feuillus que chez les résineux ; Webb 1976). Or, cela n'a lieu qu'en dernier recours, lorsque les conditions microenvironnementales sont momentanément (en général, pendant plus d'une semaine) défavorables à la photosynthèse (Ritchie et Dunlap 1980). Chose certaine, dans ces circonstances, l'utilisation des réserves affaiblit les plants (Canham *et al.* 1999, Kobe 1997). Cela veut dire que les conditions permettant la photosynthèse sont nécessaires à la production efficace de nouvelles racines (Noland *et al.* 1997, Puttonen 1986, Ritchie 1982), lesquelles sont nécessaires pour créer, après la mise en terre, le lien entre la motte racinaire du plant et le sol environnant. C'est ce lien, plus ou moins solide dans les débuts, qui permet à tout plant récemment mis en terre d'acquérir l'eau pour contrer la demande évaporative de l'air et éviter la dessiccation (Grossnickle 2005, McDowell *et al.* 2008), soit la cause la plus fréquente de mortalité à ce stade (Burdett 1990). Paradoxalement, tant que ce lien n'est pas bien établi, la photosynthèse (nécessaire à la croissance racinaire) n'est souvent pas optimale, par exemple à cause du stress hydrique qui est fréquent après la mise en terre (Burdett 1990, Kramer 1986, Margolis et Brand 1990), notamment en mi-journée ou durant les jours chauds

et secs. C'est d'ailleurs en partie pourquoi, en Europe, on évite généralement de mettre en terre des plants au cœur de l'été (Helenius 2005, Luoranen *et al.* 2023, Nilsson *et al.* 2010).

Ainsi, en raison des conditions d'humidité et de disponibilité de l'eau dans le sol, la mise en terre au printemps ou en automne peut sembler avantageuse. Malgré cela, au début du printemps, même si la température de l'air peut devenir rapidement favorable aux échanges gazeux sous les latitudes nordiques, le sol encore gelé ou froid empêche ou limite la croissance des racines (Alvarez-Uria et Körner 2007, Kul *et al.* 2020). De même, dès le début de septembre, la diminution rapide de la photopériode et des températures de l'air et du sol, puis l'augmentation progressive de l'endurcissement au froid et l'entrée en dormance, réduisent grandement la photosynthèse (DeLucia 1987, Mäkela *et al.* 2004, Martel *et al.* 2005, Stinziano et Way 2017) et donc la croissance racinaire (Luoranen 2018, Ritchie et Dunlap 1980). En outre, le refroidissement du sol augmente la viscosité et la résistance à l'écoulement de l'eau, ce qui rend son prélèvement par les racines plus difficile (Day *et al.* 1990, Grossnickle 1988, Running et Reid 1980). Dans ce contexte, même si l'eau est disponible dans le sol, les plants peuvent ne pas être en mesure de la prélever pour combler les pertes par transpiration (Krasowski *et al.* 1996). Un tel déficit peut causer une perte de turgescence de la tige ainsi que des lésions et des embolies dans le système vasculaire (Folk *et al.* 1996, Taylor *et al.* 2009). Ces dommages peuvent rendre les plants vulnérables à la dessiccation hivernale et au gel (Horntvedt et Venn 1980). En somme, quelle que soit la saison, l'interdépendance entre la photosynthèse et la croissance racinaire, dont l'équilibre est influencé par le niveau de stress associé aux conditions environnementales, constitue un mécanisme déterminant pour la survie initiale, l'établissement et la croissance subséquente des plants nouvellement mis en terre.

Le succès de la mise en terre des plants résineux varie aussi en fonction de leur qualité initiale (Grossnickle et Ivetic 2022). Différents attributs morphologiques et physiologiques des plants peuvent jouer un rôle sur l'avenir de la plantation, en ce qui a trait au taux de survie et à la croissance des plants (Grossnickle 2012, Grossnickle et MacDonald 2018a, 2018b, Landis *et al.* 2010). Parmi ceux-ci, mentionnons entre autres la hauteur du plant, le diamètre de la tige, la masse du système racinaire, l'équilibre entre les parties aériennes et souterraines, l'architecture des racines, la capacité de croissance racinaire, le statut nutritif et hydrique, la fluorescence de la chlorophylle, la

résistance à la sécheresse et la tolérance au gel. L'incidence et l'importance de ces attributs peuvent toutefois varier selon les conditions de site. Par exemple, en sol sec, les plants de fortes dimensions (hauteur et diamètre plus grands) peuvent subir un stress hydrique plus grand que ceux de plus petit calibre (Stewart et Bernier 1995). En revanche, lorsque la végétation concurrente est abondante, les plants de fortes dimensions sont avantagés (Jobidon et al. 2003, South et Rakestraw 2004, Thiffault et al. 2014).

### 3.3. Effets de la période de mise en terre documentés dans la littérature

#### 3.3.1. Survie

Les résultats des recherches scientifiques comparant la survie (ou la mortalité) de plants résineux mis en terre au printemps, durant l'été et à l'automne sont plutôt variables. Cela est dû au fait que la survie dépend en général de nombreux facteurs, dont seulement certains sont associés à la période de mise en terre. Ainsi, bon nombre d'études ne rapportent aucune différence significative de survie entre les plantations de printemps, d'été et d'automne (Alm 1983, Folk et al. 1994, Luoranen et al. 2006, 2011, Miller 1981, Repáč et al. 2021), alors que d'autres ont trouvé des différences notables en certaines circonstances. On constate toutefois que les fenêtres temporelles de mise en terre étudiées varient passablement d'une étude à l'autre (tableau 1).

Dans le sud de l'Ontario, Mullin (1968) a mesuré des taux de survie variant de 31 % à 50 % chez des plants de pin blanc (*Pinus strobus* L.) et de pin rouge (*P. resinosa* L.) mis en terre à l'automne. La forte mortalité s'expliquait par le déséquilibre entre la masse racinaire et aérienne et la dessiccation découlant de la production insuffisante de racines après la mise en terre automnale. Dans le sud de la Saskatchewan — qui, il faut le dire, reçoit moins de la moitié des précipitations du Québec — des taux de survie insatisfaisants à la suite de tests effectués sur plusieurs années n'ont pas permis de recommander la mise en terre en fin d'été (seconde moitié d'août) pour le pin sylvestre et l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) (Cram et Thompson 1981). La mortalité observée mettait en lumière la vulnérabilité des plants mis en terre tardivement à divers stress, dont la sécheresse et le froid (Folk et al. 1996, Pikkarainen et al. 2020, Taylor et al. 2009).

Dans le nord de l'Idaho, aux États-Unis, Sinclair et Boyd (1973) ont rapporté une survie plus faible (parfois très basse) pour des plants de sapin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), d'épinette d'Engelmann (*Picea engelmannii* Parry ex Engelm.) et de mélèze occidental (*Larix occidentalis* Nutt.) mis en terre de la mi-septembre à la mi-octobre, comparativement à d'autres qui avaient été mis en terre de la mi-mai à la mi-juin. Les causes de mortalité étaient liées à un manque d'endurcissement et à une croissance racinaire déficiente durant l'automne. Dans la région de Vancouver, au Canada, des suivis opérationnels réalisés par le Service forestier de la Colombie-Britannique dans la décennie 1970 ont montré que les taux de survie de plants résineux étaient généralement plus élevés dans les plantations de printemps que dans celles d'automne (Krumlik 1984). L'humidité du sol insuffisante au milieu de l'automne dans cette région et ensuite, les températures du sol trop froides pour soutenir une croissance racinaire adéquate étaient les causes les plus plausibles de mortalité.

En Norvège, la mortalité plus forte de plants d'épinette mis en terre en novembre comparativement à celle de plants mis en terre en août et septembre a été associée aux températures froides sévissant à ce moment de l'année (Wallertz et al. 2016). De même, en Finlande, Luoranen et al. (2018) ont attribué l'échec de survie de plants de pin sylvestre aux dommages racinaires induits par des températures hivernales froides et soudaines (sans neige au sol) à la suite d'une mise en terre s'étalant du début septembre à la fin d'octobre.

En général, le succès de la mise en terre tardive, en ce qui concerne la survie des plants, est fonction de multiples facteurs associés aux méthodes culturales, aux variables météorologiques et environnementales (affectant directement la physiologie) et aux caractéristiques physiques du site de plantation. Selon les circonstances, le manque d'endurcissement au froid et les dommages qui en découlent, une croissance racinaire insuffisante et le soulèvement par le gel comptent parmi les causes les plus courantes de mortalité.

#### 3.3.2. Endurcissement au froid et dommages hivernaux

L'endurcissement au gel et aux températures très froides de l'hiver est un processus physiologique vital qui s'amorce dès la fin de la saison de croissance. Il se poursuit durant l'automne et peut être perturbé par différents facteurs (Bigras et al. 2001, Lamhamedi

et al. 2022, Sakai et Larcher 1987). Par exemple, une diminution de la teneur en eau du sol, généralement observable en fin d'été, tend à hâter l'endurcissement. Ainsi, une anomalie dans les précipitations ou un stress de plantation durant cette période cruciale pourrait nuire à la séquence normale de ce processus (Sinclair et Boyd 1973). L'endurcissement au froid des plants mis en terre tardivement peut aussi varier selon les pratiques culturales (Lamhamedi et al. 2022). Par exemple, la diminution de l'irrigation et/ou un contrôle de la fertilisation peuvent, au moment opportun, hâter l'endurcissement des plants (Colombo et al. 2001, Silim et Lavender 1994). Un manque ou une perte d'endurcissement durant la saison froide peut se traduire par des dommages cellulaires directs par le gel, avec des symptômes comparables à ceux de la dessiccation hivernale (Krasowski et Simpson 2001).

Dans l'Ouest canadien, pour des plants d'épinette d'Engelmann et de thuya géant (*Thuja plicata* Donn ex D. Don) mis en terre à l'automne, Miller (1982) a rapporté un faible taux de survie à cause d'un manque d'endurcissement. En Finlande, Pikkarainen et al. (2020) et Luoranen et al. (2022) ont observé que des plants d'épinette de Norvège mis en terre en septembre et en octobre ont davantage souffert de dommages induits par le gel que ceux mis en terre durant la période allant d'avril à juillet. En Norvège, Wallertz et al. (2016) rapportent que des plants d'épinette mis en terre en novembre ont été beaucoup plus affectés par la dessiccation hivernale que ceux mis en terre en août et septembre. Ces auteurs ont alors recommandé d'éviter la mise en terre durant cette période dans les secteurs où la couverture nivale et les conditions hivernales sont peu fiables, ce qui risque d'être chose courante avec les changements climatiques (Luoranen et al. 2018, 2022).

Selon Luoranen et al. (2006), le risque d'un manque d'endurcissement peut être atténué en appliquant un traitement artificiel de jours courts en pépinière (Bigras et d'Aoust 1992, 1993, Fløistad et Granhus 2010) sur les plants devant être mis en terre en fin d'été et durant l'automne. Ce traitement consiste à réduire quotidiennement la photopériode en plaçant, par exemple, une toile en polythène noire environ 40 cm au-dessus des apex terminaux des plants en production (Lamhamedi et al. 2009). Cette pratique courante en Scandinavie permet aussi aux plants mis en terre tardivement d'être plus tolérants à la sécheresse (Luoranen et al. 2007). Cela constitue un avantage dans le contexte où ces plants produisent peu ou pas de nouvelles racines (figures 2 et 3) et risquent donc d'être vulnérables en cas de sécheresse au printemps suivant.

### 3.3.3. Croissance racinaire

Déterminante pour la survie et l'établissement des plants, la croissance des racines peut être affectée par la période de mise en terre (comme on l'a vu à la section 3.2). De manière générale, et contrairement à ce qu'on pourrait penser, la croissance racinaire de plants résineux mis en terre sous les latitudes nordiques est plus importante en juillet et tôt en août que plus tard en fin d'été, en automne et au début du printemps (Luoranen et al. 2006). Selon Mattsson (1986) et Nyström (1991), les plants résineux produits en Suède peuvent tout de même avoir un certain potentiel de croissance racinaire en septembre et en octobre, mais définitivement moins qu'en juillet et au début d'août.

Luoranen (2018) a observé qu'au printemps, la croissance racinaire des plants de pin sylvestre et d'épinette de Norvège mis en terre à la fin de l'été précédent (après la mi-août) débutait plus rapidement que pour ceux mis en terre durant l'automne précédent (mi-septembre à mi-octobre). Il n'y avait toutefois pas de différence dans la phénologie du débourrement subséquent. Ce retard indique donc que les plants mis en terre tardivement risquent de subir un important stress hydrique et d'être vulnérables à la sécheresse au cours du printemps et de l'été de l'année suivante. En Finlande, Pikkarainen et al. (2020) ont observé que des plants d'épinette de Norvège mis en terre en septembre et en octobre ont davantage souffert de dommages induits par la sécheresse que ceux mis en terre durant la période d'avril à juillet, comme l'avait prédit Luoranen (2018). Aux États-Unis, dans le nord de l'Idaho, Adams et al. (1991) ont noté, pour trois espèces résineuses, que les plants mis en terre à l'automne précédent (du début octobre au début novembre) n'étaient pas aussi bien établis que ceux mis en terre durant l'été précédent (de la mi-août à la mi-septembre), en raison d'un développement racinaire insuffisant (figure 3).

Un aspect qui mériterait d'être mieux documenté est l'effet négatif que peut avoir le fait de retarder la mise en terre sur la croissance racinaire courante et subséquente de plants produits en récipients. Lorsque la mise en terre est prévue au printemps ou durant l'été, mais qu'elle est retardée à l'automne, les racines des plants continuent de croître dans un récipient dont le volume n'est pas conçu à cette fin (Landis et al. 2010). La densité excessive et la déformation des racines dans la motte de terreau qui peut en découler (Balisky et al. 1995) tend à réduire la capacité de croissance racinaire et la performance des plants (Endean et Carlson 1975, Josefsson 1991,

South *et al.* 2005). Cet effet peut d'ailleurs perdurer après la mise en terre (Luoranen et Rikala 2013). La congestion et la déformation du système racinaire dans le récipient peuvent également engendrer des problèmes de développement des racines (architecture) et de stabilité des futurs arbres (Balisky *et al.* 1995, Burdett *et al.* 1983). En outre, plus on attend avant de mettre en terre les plants, plus leur feuillage devient dense. Les aiguilles, entremêlées avec celles des plants adjacents, deviennent alors vulnérables aux maladies fongiques en raison d'une mauvaise aération et d'une disponibilité moindre de la lumière (Luoranen *et al.* 2005). Afin d'éviter ces problèmes, il faut ajuster l'organisation, les méthodes et la synchronisation de la production des plants lorsqu'il est souhaité ou inévitable de retarder la mise en terre. D'ailleurs, dans l'Ouest canadien et en Europe centrale, les plants forestiers dont la mise en terre est prévue à l'automne sont produits l'année même, durant l'été.

### 3.3.4. Soulèvement par le gel (« déchaussement »)

Le soulèvement par le gel de la motte racinaire après la mise en terre de plants forestiers produits en récipients (figure 4) est un problème connu qui peut survenir à l'automne et en début d'hiver, avant que la neige ne recouvre le sol (Goulet 1995, 2000, Landis *et al.* 2010, Sahlén et Goulet 2002). C'est aussi une cause non négligeable de mortalité des plants mis en terre en zone boréale. Cette mortalité est attribuable, entre autres, à l'exposition partielle du système racinaire aux éléments (soleil, vent, gel) et au bris mécanique des racines engendrés par le mouvement vertical lors du soulèvement par le gel (de Chantal *et al.* 2003, Goulet 2000, Shaw *et al.* 1987). Lorsqu'ils survivent, les plants soulevés par le gel peuvent être plus sensibles à la sécheresse et subir une baisse de croissance, puis leur stabilité peut aussi être compromise (de Chantal *et al.* 2003, Goulet 1995, Shaw *et al.* 1987). Les racines exposées peuvent subir d'importants dommages par le gel, qui compromettent la survie et la croissance du plant (Bigras et Dumais 2005, Dumais *et al.* 2002, Lindström et Nyström 1987, Lindström et Stattin 1994). En automne, les conditions peu propices à la croissance de nouvelles racines ne permettent pas aux plants de s'ancrer suffisamment bien dans le sol avant l'arrivée des premières gelées (de Chantal *et al.* 2003, 2004, Goulet 1995, Krumlik 1984). Ainsi, le problème du soulèvement par le gel peut être accentué par une mise en terre tardive (de Chantal *et al.* 2003, Krumlik 1984).

Certains facteurs peuvent contribuer au soulèvement des plants par le gel. Par exemple, les risques sont plus élevés lors de cycles répétés de gel-dégel (notamment sur des sites avec une exposition sud ou

sud-ouest), en milieu exposé (sans végétation ou sans couvert forestier partiel), dans les sols humides, à texture fine ou avec une conductivité hydraulique élevée et lorsque le couvert de neige tarde à s'installer (Bergsten *et al.* 2001, de Chantal *et al.* 2006, Heiskanen *et al.* 2013, Sahlén et Goulet 2002, Shaw *et al.* 1987). Dans ces circonstances, le choix des sites désignés pour une mise en terre tardive apparaît donc crucial.



**Figure 4.** Exemples de soulèvement par le gel de plants d'épinette noire en forêt boréale québécoise (Photos : Nelson Thiffault, Ressources naturelles Canada).

La perturbation du sol, notamment par les opérations de récolte et de préparation de terrain, peut aussi influencer le risque de soulèvement par le gel (de Chantal *et al.* 2006, Goulet 1995, Heiskanen *et al.* 2013) et la mortalité subséquente (Örlander *et al.* 1990). D'un côté, un scarifiage trop intense peut augmenter le risque puisque le fait de retirer l'humus et la végétation — qui agissent comme une barrière isolante — peut accroître les fluctuations de température diurne du sol. D'un autre côté, en sol humide, les épaulements et les buttes des sillons créés par le scarifiage permettent d'éliminer le surplus d'eau, ce qui réduit le risque de soulèvement des plants qui s'y trouvent.

La taille des plants, l'essence et la profondeur de mise en terre peuvent également influencer le risque de soulèvement par le gel. Les plants plus gros sont moins sujets au phénomène (Goulet 1995). En ce qui concerne le taux de mortalité post-soulèvement, les épinettes semblent être plus vulnérables que les pins, en raison de leurs racines plus fines (de Chantal *et al.* 2003, 2004). Enfin, une mise en terre plus profonde qu'à l'habitude (5-6 cm sous la surface du sol, lorsque possible pour l'espèce) peut réduire le risque de soulèvement par le gel (de Chantal *et al.* 2009, Luoranen 2018, Schwan 1994).

### 3.3.5. Croissance aérienne

Les effets rapportés ci-dessus sont susceptibles de réduire la croissance des parties aériennes des plants résineux après leur mise en terre, et par le fait même, leur capacité à concurrencer les espèces non désirées (p. ex., feuillus intolérants à l'ombre, arbustes récalcitrants). Toutefois, contrairement à ce qui s'observe pour la croissance racinaire, la littérature ne fait ressortir aucune tendance claire en ce qui a trait à la croissance en hauteur des plants selon qu'ils sont mis en terre au printemps, en été et à l'automne (Grossnickle et MacDonald 2021). Certaines études rapportent une meilleure croissance pour les plants mis en terre au printemps ou durant l'été (p. ex., Miller 1981), certaines autres indiquent une meilleure croissance pour les plants mis en terre en automne (p. ex., Luoranen *et al.* 2006), alors que d'autres encore montrent une croissance similaire pour les différentes périodes (p. ex., Miller 1982).

Luoranen et Rikala (2013) et Narimatsu *et al.* (2016) ont observé, respectivement pour le pin sylvestre et le mélèze du Japon (*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.), que les plants mis en terre à l'automne avaient une croissance plus faible durant les années suivantes comparativement à ceux mis en terre au printemps. D'après Grossnickle (2000), après deux saisons

de croissance, les plants d'épinette mis en terre au printemps sont généralement plus robustes (leur coefficient d'élanement est plus faible) que ceux mis en terre plus tard en saison. Après deux saisons de croissance, les plants mis en terre au printemps ont également un plus grand nombre de branches et de bourgeons. Avec les années, ces différences peuvent toutefois s'atténuer. Lorsqu'ils survivent, les plants mis en terre durant l'automne peuvent parfois, et en certaines circonstances, être avantagés pour leur croissance subséquente comparativement à ceux mis en terre au printemps (Repáč *et al.* 2017, 2021). Par exemple, en Pologne, Barzdajn (2010) a observé une meilleure croissance pour des plants de pin sylvestre mis en terre à la fin d'octobre plutôt qu'au début d'avril. Cet effet a été attribué au manque d'eau et aux températures élevées tôt en saison, lesquels sont de plus en plus observés en Europe (Gera *et al.* 2019).

## 3.4. Effets anticipés et risques au Québec

Jusqu'à maintenant, il n'existe pas (ou que très peu) de littérature scientifique pour documenter les effets mesurés de la mise en terre tardive (après la mi-septembre) de plants résineux au Québec. Nous devons donc anticiper les effets potentiels et évaluer les risques sur la base des études scientifiques présentées plus haut, qui ont été réalisées dans des contextes s'apparentant en partie à celui du Québec. Mais auparavant, résumons un peu les principes qui ont guidé jusqu'à maintenant la mise en place de nos plantations de résineux (Thiffault *et al.* 2013).

Tout d'abord, le Québec est depuis longtemps un chef de file en matière de plants forestiers résineux produits en récipients. L'expertise développée au fil des ans dans ce domaine, et basée sur la recherche scientifique (notamment en écophysiologie et en génétique), a permis aux pépinières gouvernementales et privées de mettre au point des pratiques culturelles éprouvées (Colas *et al.* 2003). Ces dernières résultent encore aujourd'hui en la production de plants résineux de qualité, répondant à des standards obligatoires et vérifiés quant à leurs propriétés physiologiques (p. ex., le rapport de la hauteur sur le diamètre, le développement du système racinaire et la teneur foliaire en azote; Groupe normes DGSPF-RRPSP 2019). Cette rigueur dans la chaîne québécoise de production de plants vise à assurer que la performance des plants (taux de survie et développement après leur mise en terre) soit conséquente avec les investissements consentis en amont. Bien entendu, ce succès suppose aussi que la plantation soit bien réalisée et entretenue par la suite (BFEC 2015, MFFP 2016).

Pour mener à bien les plantations forestières de résineux au Québec et atteindre leurs objectifs, plusieurs grands principes découlant aussi de la recherche guident le choix de l'essence, de la provenance (source des semences) et du type de plant, la gestion de la végétation concurrente, la préparation du site de plantation et le choix du microsite lors de la mise en terre — et ce, depuis plusieurs années. Le choix de l'essence est guidé par les facteurs comme l'exposition de la pente, le climat, les risques associés aux différents facteurs biotiques et abiotiques, le type de sol, sa texture et l'épaisseur du dépôt, le drainage, l'indice de qualité de station, l'existence d'un couvert forestier résiduel, la présence de végétation concurrente, l'historique de la station et les contraintes environnementales (Thiffault *et al.* 2013). Dans les stations à fort potentiel de concurrence végétale, la mise en terre rapide, dès l'année suivant la récolte, est recommandée afin de profiter du délai d'installation de la végétation concurrente et de procurer un avantage concurrentiel aux plants (Thiffault et Roy 2011). Les plants mis en terre plus tard risquent d'être soumis à une concurrence plus forte durant leur phase d'établissement. Comme l'usage des phytocides chimiques est interdit en forêt depuis 2001 au Québec (MRN 1994), l'utilisation de plants de fortes dimensions et la maîtrise de la végétation concurrente par dégagement mécanique caractérisent la chaîne opérationnelle de nos plantations forestières (Thiffault et Hébert 2013, Thiffault *et al.* 2013). D'ailleurs, les gains appréciables (survie, croissance et vigueur) associés à la gestion de la végétation concurrente sont bien connus (p. ex., Balandier *et al.* 2006, Walstad et Kuch 1987). La préparation du terrain et le choix du microsite de plantation sont également des éléments cruciaux à considérer (Henneb *et al.* 2020, Thiffault *et al.* 2013). La préparation du terrain améliore notamment les conditions de température du sol et sa fertilité (surtout en forêt boréale), de même que le nombre et la distribution des microsites de plantation adéquats (Örlander *et al.* 1990, Prévost 1992, Prévost et Thiffault 2013), en plus de réduire la concurrence végétale (Prévost 1996, 1997, Reicis *et al.* 2023, Sutherland et Foreman 2000).

Enfin, mentionnons que la plantation d'enrichissement et le regarni constituent deux variantes de la plantation conventionnelle qui sont de plus en plus utilisées au Québec, entre autres pour la réhabilitation, la restauration et la migration assistée (p. ex., Bourque *et al.* 2022, Dumais et Prévost 2019, Dumais *et al.* 2019, 2020, Royo *et al.* 2023). Ces traitements, qui visent respectivement à améliorer la valeur (composition) et la densité du peuplement, se

distinguent en général par la présence d'un couvert forestier partiel ou d'une cohorte de régénération déjà en place et l'absence de préparation de terrain (Gravel *et al.* 2016b, Thiffault *et al.* 2013).

Malgré tous ces principes et toutes ces volontés, la réalité des opérations impose parfois des contraintes. Par exemple, même si le choix d'un type de plant ou d'une essence devrait être guidé par le risque d'envahissement par des espèces concurrentes et par les caractéristiques pédoclimatiques des sites de plantation, d'autres facteurs comme la disponibilité du matériel peuvent intervenir. De même, il arrive que la maîtrise de la végétation concurrente par dégagement mécanique ne se fasse pas au moment opportun ou de façon assidue, par exemple en raison d'un manque de main-d'œuvre ou de choix budgétaires incontournables. De telles situations peuvent alors entraîner une baisse de rendement général des plantations, comme l'ont rapporté Barrette *et al.* (2024).

Compte tenu des pratiques actuelles en matière de production et de mise en terre de plants forestiers résineux (MFFP 2016) et de la réalité opérationnelle, voici maintenant comment nous évaluons et justifions les risques associés à la mise en terre tardive dans le contexte québécois (tableau 2). Cette analyse tient compte des différents effets possibles rapportés dans la littérature scientifique, tels que nous les avons exposés à la section 3.3.

#### 3.4.1. *Survie*

La baisse du taux de survie est l'effet anticipé (indirect) de la mise en terre tardive qui pourrait dépendre du plus grand nombre de facteurs, dont certains autres effets ou conséquences anticipés (p. ex., le soulèvement par le gel). C'est aussi l'effet pour lequel on rapporte le plus de variabilité et d'incertitude dans la littérature. Cela dit, la cause qui explique très souvent la mortalité des plants mis en terre tardivement, soit une croissance racinaire insuffisante, est particulièrement susceptible de se produire au Québec. En effet, le climat québécois, notamment aux latitudes où sont principalement mis en terre des plants résineux, se caractérise par une courte saison de croissance, une diminution rapide (dès le début septembre) de la photopériode et des températures, ainsi que des conditions hivernales rigoureuses pouvant survenir hâtivement, et ce, malgré les changements climatiques. En conséquence, le risque qu'une mise en terre tardive réduise significativement la survie des plants au Québec est jugé **modéré**.

**Tableau 2.** Résumé des effets (ou conséquences) anticipés et des risques de la mise en terre tardive (après la mi-septembre) de plants forestiers résineux produits en récipients dans le contexte québécois.

Effet (ou conséquence) anticipé	Risque	Commentaires et notes explicatives
Baisse du taux de survie (mortalité)	Modéré	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Causes multiples;</li> <li>• Résultats variables (littérature);</li> <li>• Phénomène lié à d'autres effets ou conséquences anticipés (y compris la croissance racinaire insuffisante);</li> <li>• Effet difficile à prédire (pas ou peu de données).</li> </ul>
Manque d'endurcissement et dommages hivernaux	Faible à modéré	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Méthodes culturales éprouvées au Québec;</li> <li>• Incertitude liée à l'effet sur l'endurcissement du stress de plantation et de l'arrosage des plants en automne jusqu'à leur mise en terre;</li> <li>• Dessiccation hivernale possible (réserve d'eau insuffisante par manque de nouvelles racines).</li> </ul>
Croissance racinaire insuffisante ou retardée	Élevé	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baisse rapide de la photopériode, de la photosynthèse et des températures dès le début septembre au Québec;</li> <li>• Effet largement documenté (littérature).</li> </ul>
Soulèvement par le gel	Modéré à élevé	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Phénomène exacerbé par l'arrivée rapide du gel au sol en début d'automne au Québec, combiné à une croissance racinaire insuffisante durant cette période;</li> <li>• Sols boréaux du Québec généralement humides et donc propices au phénomène;</li> <li>• Couvert protecteur de neige au sol (effet isolant) arrivant de plus en plus tardivement au Québec en raison des changements climatiques;</li> </ul>
Perte de croissance aérienne	Modéré	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensiblement les mêmes commentaires et explications que pour la baisse du taux de survie.</li> </ul>

### 3.4.2. Endurcissement au froid et dommages hivernaux

Les méthodes et pratiques culturales québécoises, éprouvées depuis longtemps, donnent lieu encore aujourd'hui à des plants résineux qui sont bien endurcis et aptes à affronter les températures hivernales très froides qui, au Québec, peuvent survenir dès l'automne et le début de l'hiver (Lamhamedi *et al.* 2022). À première vue, le seul fait de retarder la mise en terre de plants prêts pour le reboisement ne devrait pas affecter leur endurcissement au froid. Or, un choc de transplantation peut perturber ce processus si la mise en terre est tardive. De plus, la pratique d'arroser régulièrement les plants (et peut-être même de les fertiliser) durant l'automne jusqu'à leur mise en terre pourrait influencer l'endurcissement (Lamhamedi *et al.* 2022), mais cet effet demeure méconnu dans le contexte d'une mise en terre tardive.

La dessiccation hivernale est la cause la plus courante de dommages foliaires hivernaux. Même si ce phénomène n'est pas lié à l'endurcissement comme tel (Perkins *et al.* 1991), il pourrait se manifester sur les plants mis en terre tardivement (Luoranen *et al.* 2022), en raison d'une diminution de la réserve d'eau du feuillage découlant du manque

de nouvelles racines. Toutefois, l'occurrence du phénomène pourrait vraisemblablement être limitée par la présence habituelle d'un couvert de neige qui protège les plants (Luoranen *et al.* 2022). Ainsi, le risque que les plants mis en terre tardivement au Québec ne s'endurcissent pas suffisamment au froid ou qu'ils subissent divers types de dommages hivernaux est jugé **faible à modéré**.

### 3.4.3. Croissance racinaire

D'après les données disponibles dans la littérature scientifique, la croissance insuffisante ou retardée des racines est vraisemblablement l'effet anticipé le plus observable d'une mise en terre tardive. C'est aussi l'effet susceptible d'être le plus déterminant sous les conditions présentes au Québec, en raison de la baisse rapide de la photopériode et des températures de l'air et du sol dès le début du mois de septembre. Même avec les changements climatiques, le manque de lumière à cette période de l'année est incontournable sous les latitudes québécoises, ce qui diminue grandement l'activité photosynthétique et la capacité des plants à produire suffisamment de racines pour s'ancrer au sol environnant (Grossnickle 2000, Grossnickle et Ivetic 2022). La croissance racinaire insuffisante

ou retardée est une cause importante de mortalité, car elle limite l'accès à l'eau et aux nutriments du sol, en plus de rendre les plants vulnérables au soulèvement par le gel (de Chantal et al. 2003). Ces effets agissent donc en interaction.

Bien qu'au Québec, les débuts de printemps des dernières années aient eu une allure plutôt hivernale, l'arrivée soudaine et rapide de la chaleur (p. ex., Benomar et al. 2022, Luoronen et al. 2023, Marquis et al. 2022) et de la sécheresse (p. ex., Luoronen et al. 2023, Ruosteenoja et al. 2018, Venäläinen et al. 2020) est de plus en plus souvent observée en zone boréale, et ce, dès le mois de mai. Ces stress peuvent mettre à rude épreuve les plants mis en terre tardivement durant l'année précédente, et dont la croissance de nouvelles racines serait à peu près inexistante (figure 3). Ainsi, le risque que la mise en terre tardive entraîne une croissance racinaire insuffisante des plants au Québec est jugé **élevé**.

#### 3.4.4. Soulèvement par le gel

Comme nous l'avons précédemment souligné, le soulèvement par le gel des plants résineux (figure 4) mis en terre tardivement risque davantage de se produire lorsque leur motte racinaire n'est pas bien ancrée au sol environnant en raison d'une croissance racinaire insuffisante. Comme cette situation a été jugée problématique sous les conditions du Québec, le risque de soulèvement par le gel s'en trouve augmenté. De plus, bon nombre des sols boréaux dans la province sont plutôt humides, et encore plus durant l'automne. D'un autre côté, un couvert isolant de neige peut être présent au sol dès le mois d'octobre en zone boréale. Les changements climatiques tendent cependant à retarder l'arrivée de la neige, car plus de précipitations tombent sous forme de pluie en fin d'automne et en début d'hiver. En conséquence, le risque que la mise en terre tardive entraîne du soulèvement par le gel des plants au Québec est jugé **modéré à élevé**.

#### 3.4.5. Croissance aérienne

La croissance aérienne des plants nouvellement mis en terre est tributaire de leur état physiologique et de leur accès aux ressources environnementales (lumière, eau, nutriments). La littérature rapporte des résultats disparates quant à l'effet de la mise en terre tardive sur la croissance aérienne (au même titre que pour la survie). Néanmoins, à cause de la croissance racinaire réduite elle aussi, le risque que la mise en terre tardive entraîne par la suite une perte de croissance aérienne des plants au Québec est jugé **modéré**.

## 4. Synthèse, conclusions et recommandations

Le manque flagrant de connaissances scientifiques sur les effets de la mise en terre tardive sur la survie et la performance des plants résineux produits en récipients dans le contexte québécois ne fait aucun doute. Or, cette pratique gagne tout de même en popularité, et l'investissement public consenti annuellement dans la production de millions de plants forestiers est important. La présente revue et analyse de la littérature a permis de faire ressortir les effets possibles et observés de cette pratique dans d'autres régions nordiques de la planète, où les conditions climatiques et environnementales s'apparentent en partie à celles du Québec.

Considérant la réalité québécoise (essences de reboisement, climat régional, pratiques culturelles, préparation du site et méthodes de mise en terre), nous avons estimé l'ampleur du risque pour chacun des effets ou des conséquences anticipés. Au terme de l'exercice, les conclusions et recommandations suivantes ressortent :

- 1) Au Québec, la mise en terre tardive (après la mi-septembre) demeure pour l'instant une option à utiliser avec discernement puisqu'elle comporte son lot de risques à ne pas sous-estimer, contrairement à la mise en terre conventionnelle (printemps et été).
- 2) Cette pratique peut diminuer la survie des plants, leur durcissement au froid, leur croissance racinaire et aérienne et contribuer à leur soulèvement par le gel. Au Québec, le risque associé à la mise en terre tardive a été jugé **faible à modéré** pour la réduction de l'endurcissement et l'incidence de dommages hivernaux, **modéré** pour la baisse de survie et la perte de croissance aérienne, **modéré à élevé** pour le soulèvement par le gel, et **élevé** pour la croissance racinaire insuffisante (tableau 2).
- 3) Dans les cas où une mise en terre aurait lieu tardivement, il est impératif de tenir compte des facteurs mis en lumière dans la présente note afin de minimiser les risques (p. ex., éviter la mise en terre tardive dans les endroits connus pour avoir un faible couvert de neige ou peu de végétation, planter les semis un peu plus profondément lorsque possible; tableau 3). Ainsi, la mise en terre tardive nécessite d'ajuster le choix des sites, et idéalement, l'organisation, les méthodes et la synchronisation de la production des plants.

4) Pour accroître les connaissances sur les effets de la mise en terre tardive sur la survie et la performance subséquente des plants forestiers au Québec et mieux orienter la prise de décisions, il serait pertinent d'expérimenter la mise en terre automnale (de la mi-septembre à la fin octobre) en

effectuant des suivis d'efficacité basés sur un protocole de recherche ou en établissant des projets pilotes consacrés à cette pratique. Les besoins de recherche qui ont été identifiés dans le cadre du présent exercice sont présentés au tableau 3.

**Tableau 3.** Résumé des faits saillants, pistes de solution et besoins de recherche au Québec (par effet ou conséquence anticipé) en ce qui a trait à la mise en terre tardive (après la mi-septembre) de plants forestiers résineux produits en récipients.

Effet (ou conséquence) anticipé	Faits saillants et pistes de solution	Besoins de recherche au Québec
Baisse du taux de survie (mortalité)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Effet indirect (influencé par d'autres effets, conséquences ou facteurs).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Étudier les mécanismes sous-jacents à la mortalité des plants résineux associée à la mise en terre tardive;</li> <li>Déterminer les taux de mortalité des plants résineux associés à la mise en terre tardive.</li> </ul>
Manque d'endurcissement au froid et dommages hivernaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>Effet rapporté, mais dont les mécanismes sous-jacents restent à élucider;</li> <li>Rôle possible du stress de plantation interférant avec le processus normal d'endurcissement qui s'opère en fin d'été et durant l'automne;</li> <li>Importance du couvert de neige (effet protecteur).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Étudier la dynamique d'endurcissement des plants résineux mis en terre tardivement (par rapport au printemps et pendant l'été);</li> <li>Déterminer si le stress physiologique de mise en terre peut nuire au processus normal d'endurcissement des plants résineux mis en terre tardivement;</li> <li>Déterminer si les plants résineux mis en terre tardivement sont plus sujets aux dommages hivernaux (dont la dessiccation hivernale).</li> </ul>
Croissance racinaire insuffisante ou retardée	<ul style="list-style-type: none"> <li>En automne, la faible luminosité qui inhibe la photosynthèse (indépendamment des changements climatiques) et les basses températures de l'air et du sol freinent la croissance racinaire.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Étudier la physiologie et la dynamique de croissance des racines des plants résineux mis en terre tardivement (par rapport à ceux mis en terre durant le printemps ou l'été).</li> </ul>
Soulèvement par le gel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cause fréquente de mortalité après plantation en zone boréale (plants produits en récipients);</li> <li>Phénomène accentué par une croissance racinaire insuffisante ou retardée;</li> <li>Problème plus fréquent sur les sites sans végétation ou sans couvert forestier partiel, lorsque le couvert de neige est absent ou faible, sur les versants sud et sud-ouest (cycles gel-dégel), dans les sols humides (organiques, textures fines), chez les plus petits plants, chez les épinettes (racines fines);</li> <li>Planter les semis plus profondément, lorsque possible (sol, essence), peut aider à contrer l'ampleur de cet effet.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Déterminer si les plants résineux mis en terre tardivement sont plus sujets au soulèvement par le gel (et à une mortalité subséquente), et en quelles circonstances;</li> <li>Élucider le rôle des changements climatiques dans l'importance du soulèvement par le gel de plants résineux mis en terre tardivement;</li> <li>Déterminer les taux de mortalité associés au soulèvement par le gel de plants résineux mis en terre tardivement.</li> </ul>
Perte de croissance aérienne	<ul style="list-style-type: none"> <li>Effet indirect (influencé par d'autres effets, conséquences ou facteurs);</li> <li>Résultats variables selon les études.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Étudier la physiologie et la dynamique de croissance des parties aériennes des plants résineux mis en terre tardivement (par rapport à ceux mis en terre durant le printemps ou l'été).</li> </ul>

## Remerciements

Nous remercions M. François Hébert, qui a révisé la version préliminaire de cette note de recherche, M. Martin Perron, qui a agi à titre de responsable de la révision scientifique, M. Nelson Thiffault et un(e) réviseur(euse) anonyme pour leurs commentaires précieux et constructifs. Nos remerciements s'adressent également à M<sup>me</sup> Stéphanie Rivet (Pulsation graphique) pour la mise en page et le graphisme, ainsi qu'à M<sup>mes</sup> Denise Tousignant, Maude-Emmanuelle Hajjaj et Armelle Ginet pour le travail d'édition. Cette note de recherche forestière a été élaborée à la suite de discussions et d'échanges menés au sein d'un groupe de travail du MRNF sur la mise en terre tardive, auquel tous les coauteurs et toutes les coautrices ont contribué.

## Références bibliographiques

- Adams, D.L., R.T. Graham, D.L. Wenny et M. Daa, 1991. *Effect of fall planting date on survival and growth of three coniferous species of container seedlings in northern Idaho*. *Tree Planters' Notes* 42(2): 52-55. <https://rngr.net/publications/tpn/42-2/effect-of-fall-planting-date-on-survival-and-growth-of-three-coniferous-species-of-container-seedlings-in-northern-idaho>
- Alm, A.A., 1983. *Black and white spruce plantings in Minnesota: Container vs bareroot stock and fall vs spring planting*. *For. Chron.* 59(4): 189-191. <https://doi.org/10.5558/TFC59189-4>
- Alvarez-Uria, P. et C. Körner, 2007. *Low temperature limits of root growth in deciduous and evergreen temperate tree species*. *Funct. Ecol.* 21(2): 211-218. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2007.01231.x>
- Arnott, J.T., 1975. *Field performance of container-grown and bareroot trees in coastal British Columbia*. *Can. J. For. Res.* 5(2): 186-194. <http://dx.doi.org/10.1139/x75-026>
- Balandier, P., C. Collet, J.H. Miller, P.E. Reynolds et S.M. Zedaker, 2006. *Designing forest vegetation management strategies based on the mechanisms and dynamics of crop tree competition by neighbouring vegetation*. *Forestry* 79(1): 3-27. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpi056>
- Balisky, A.C., P. Salonijs, C. Walli et D. Brinkman, 1995. *Seedling roots and forest floor: Misplaced and neglected aspects of British Columbia's reforestation effort?* *For. Chron.* 71(1): 59-65. <https://doi.org/10.5558/TFC71059-1>
- Barrette, M., I. Auger, N. Thiffault et J. Barrette, 2024. *Are operational plantations meeting expectations? A large-scale assessment of realized versus anticipated yield in eastern Canada*. *Can. J. For. Res.* 54(6): 712-724. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2023-0224>
- Barzdajn, W., 2010. *The growth of the Scots pine (Pinus sylvestris L.) culture established at different planting times using container and bare-roots seedlings*. *Sylwan* 154(5): 312-322. [en polonais avec résumé en anglais] <https://doi.org/10.26202/sylwan.2009059>
- Benomar, L., J. Bousquet, M. Perron, J. Beaulieu et M. Lamara, 2022. *Tree maladaptation under mid-latitude early spring warming and late cold spell: Implications for assisted migration*. *Front. Plant Sci.* 13: 920852. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2022.920852>
- Bergsten, U., F. Goulet, T. Lundmark et M. Ottosson Lövvenius, 2001. *Frost heaving in a boreal soil in relation to soil scarification and snow cover*. *Can. J. For. Res.* 31(6): 1084-1092. <http://dx.doi.org/10.1139/x01-042>
- Bernier, P.Y., 1993. *Comparing natural and planted black spruce seedlings*. *Can. J. For. Res.* 23(11): 2427-2434. <https://doi.org/10.1139/X93-300>
- Bigras, F.J. et A.L. D'Aoust, 1992. *Hardening and dehardening of shoots and roots of containerized black spruce and white spruce seedlings under short and long days*. *Can. J. For. Res.* 22(3): 388-396. <http://dx.doi.org/10.1139/x92-051>
- Bigras, F.J. et A.L. D'Aoust, 1993. *Influence of photoperiod on shoot and root frost tolerance and bud phenology of white spruce seedlings (Picea glauca)*. *Can. J. For. Res.* 23(2): 219-228. <https://doi.org/10.1139/x93-029>
- Bigras, F.J. et D. Dumais, 2005. *Root-freezing damage in the containerized nursery: impact on plantation sites – A review*. *New For.* 30: 167-184. <http://dx.doi.org/10.1007/s11056-005-4423-6>
- Bigras, F.J., A. Ryyppö, A. Lindström et E. Stattin, 2001. «Cold acclimation and deacclimation of shoots and roots of conifer seedlings». Dans: Bigras, F.J. et S.J. Colombo (édit.), *Conifer cold hardiness. Tree physiology, vol. 1*. Springer, Dordrecht (Pays-Bas). p. 57-88. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9650-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9650-3_3)

- [BFEC] Bureau du forestier en chef, 2015. *Succès des plantations*. Avis du Forestier en chef. FEC-AVIS-04-2015, Roberval, Québec, 22 p. + annexes. <https://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/fec-avis-04-2015.pdf>
- Bourque, C., D. Dumais, J.-C. Ruel, C. Larouche et P. Raymond, 2022. *How do advance regeneration and planted seedlings of Thuja occidentalis and Picea rubens acclimate under a first irregular shelterwood cut?* Can. J. For. Res. 52(11): 1412-1422. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0072>
- Burdett, A.N. 1990. *Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock*. Can. J. For. Res. 20(4): 415-427. <http://dx.doi.org/10.1139/x90-059>
- Burdett, A.N., D.G. Simpson et C.F. Thompson, 1983. *Root development and plantation establishment success*. Plant Soil 71:103-110. <https://doi.org/10.1007/BF02182645>
- Burdett, A.N., L.J. Herring et C.F. Thompson, 1984. *Early growth of planted spruce*. Can. J. For. Res. 14(5): 644-651. <https://doi.org/10.1139/x84-116>
- Canham, C.D., R.K. Kobe, E.F. Latty et R.L. Chazdon, 1999. *Interspecific and intraspecific variation in tree seedling survival: Effects of allocation to roots versus carbohydrate reserves*. Oecologia 121: 1-11. <https://doi.org/10.1007/s004420050900>
- Close, D.C., C.L. Beadle, P.H. Brown, 2005. *The physiological basis of containerised tree seedling "transplant shock": a review*. Aust. For. 68(2): 112-120. <http://dx.doi.org/10.1080/00049158.2005.10674954>
- Colas, F., J. Gagnon, B.-M. Gingras, L. Labbé, M.S. Lamhamedi, N. Thiffault, D. Tousignant, F. Tremblay, M. Bettez et M. Tourigny, 2003. *La filière de production de plants au Québec : de la semence à la plantation*. Bilan d'un colloque organisé en marge du Carrefour de la recherche forestière, le 20 février 2003, au Centre des congrès de Québec. Nat. Can. 127(2) : 77-84. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Nat-Can127-2.pdf>
- Colombo, S.J. et W.C. Parker, 1999. *Does Canadian forestry need physiology research?* For. Chron. 75(4): 667-674. <http://dx.doi.org/10.5558/tfc75667-4>
- Colombo, S.J., M. I. Menzies et C. O'Reilly, 2001. «Influence of nursery cultural practices on cold hardiness of coniferous forest tree seedlings». Dans: Bigras, F.J. et S.J. Colombo (édit.), *Conifer cold hardiness. Tree physiology, vol. 1*. Springer, Dordrecht (Pays-Bas), p. 223-252. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9650-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9650-3_9)
- Contosta, A.R., N.J. Casson, S. Garlick, S.J. Nelson, M.P. Ayres, E.A. Burakowski, J. Campbell, I. Creed, C. Eimers, C. Evans, I. Fernandez, C. Fuss, T. Huntington, K. Patel, R. Sanders-Demott, K. Son, P. Templer et C. Thornbrugh, 2019. *Northern forest winters have lost cold, snowy conditions that are important for ecosystems and human communities*. Ecol. Appl. 29(7). <http://dx.doi.org/10.1002/eap.1974>
- Cram, W.H. et A.C. Thompson, 1981. *Fall and spring transplantings of conifers in the Plains region*. Tree Planters' Notes. 32(1): 16-19. [https://rngr.net/publications/tpn/32-1/32\\_1\\_16\\_19.pdf](https://rngr.net/publications/tpn/32-1/32_1_16_19.pdf)
- Day, R.J. et G.R. MacGillivray, 1975. *Root regeneration of fall-lifted white spruce nursery stock in relation to soil moisture content*. For. Chron. 51(5): 196-199. <https://doi.org/10.5558/tfc51196-5>
- Day, T.A., E.H. DeLucia et W.K. Smith, 1990. *Effect of soil temperature on stem sap flow, shoot gas exchange and water potential of Picea engelmannii (Parry) during snowmelt*. Oecologia 84: 474-481. <https://doi.org/10.1007/BF00328163>
- de Chantal, M., K. Leinonen, H. Ilvesniemi et C.J. Westman, 2003. *Combined effects of site preparation, soil properties, and sowing date on the establishment of Pinus sylvestris and Picea abies from seeds*. Can. J. For. Res. 33(5): 931-945. <http://dx.doi.org/10.1139/x03-011>
- de Chantal, M., K. Leinonen, H. Ilvesniemi et C.J. Westman, 2004. *Effects of site preparation on soil properties and on morphology of Pinus sylvestris and Picea abies seedlings sown at different dates*. New For. 27: 159-173. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1025042632491>
- de Chantal, M., H. Rita, U. Bergsten, M. Ottoson Löfvenius et H. Grip, 2006. *Effect of soil properties and soil disturbance on frost heaving of mineral soil: A laboratory experiment*. Can. J. For. Res. 36(11): 2885-2893. <http://dx.doi.org/10.1139/x06-181>

- de Chantal, M., H. Rita, U. Bergsten, M. Ottoson Lövvenius et H. Grip, 2009. *Frost heaving of Picea abies seedlings as influenced by soil preparation, planting technique, and location along gap-shelterwood gradients*. *Silva Fenn.* 43(1): 39-50. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.214>
- DeLucia, E.H., 1987. *The effect of freezing nights on photosynthesis, stomatal conductance, and internal CO<sub>2</sub> concentration in seedlings of Engelmann spruce (Picea engelmannii Parry)*. *Plant Cell Environ.* 10(4): 333-338. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.1987.tb01614.x>
- Domisch, T., L. Finér et T. Lehto, 2001. *Effects of soil temperature on biomass and carbohydrate allocation in Scots pine (Pinus sylvestris L.) seedlings at the beginning of the growing season*. *Tree Physiol.* 21(7): 465-472. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/21.7.465>
- Dumais, D. et M. Prévost, 2019. *Nine-year physiology, nutrition and morphological development of Picea glauca reintroduced by planting in a high-graded yellow birch-conifer stand*. *Scand. J. For. Res.* 34(8): 656-666. <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2019.1656771>
- Dumais D., C. Coursolle, F.J. Bigras et H.A. Margolis, 2002. *Simulated root freezing in the nursery: Effects on the growth and physiology of containerized boreal conifer seedlings after outplanting*. *Can. J. For. Res.* 32(4): 605-615. <https://doi.org/10.1139/X02-005>
- Dumais, D., C. Larouche, P. Raymond, S. Bédard et M.-C. Lambert, 2019. *Survival and growth dynamics of red spruce seedlings planted under different forest cover densities and types*. *New For.* 50(10): 573-592. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9680-2>
- Dumais, D., P. Raymond et M. Prévost, 2020. *Eight-year ecophysiology and growth dynamics of Picea rubens seedlings planted in harvest gaps of partially cut stands*. *For. Ecol. Manage.* 478: 118514. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118514>
- Endean, F. et L.W. Carlson, 1975. *The effect of rooting volume on the early growth of lodgepole pine seedlings*. *Can. J. For. Res.* 5(1): 55-60. <https://doi.org/10.1139/x75-007>
- Fløistad, I.S. et A. Granhus, 2010. *Bud break and spring frost hardiness in Picea abies seedlings in response to photoperiod and temperature treatments*. *Can. J. For. Res.* 40(5): 968-976. <https://doi.org/10.1139/X10-050>
- Folk, R.S., S.C. Grossnickle, J.E. Major et J.T. Arnott, 1994. *Influence of nursery culture on western red cedar. II. Freezing tolerance of fall-planted seedlings and morphological development of fall- and spring-planted seedlings*. *New For.* 8: 231-247. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00025370>
- Folk, R.S., S.C. Grossnickle, J.T. Arnott, A.K. Mitchell et P. Puttonen, 1996. *Water relations, gas exchange and morphological development of fall- and spring-planted yellow cypress stecklings*. *For. Ecol. Manage.* 81(1-3): 197-213. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(95\)03642-3](https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03642-3)
- Gera, M., I.Damborská, M. Lapin et M. Melo, 2019. «Climate changes in Slovakia: Analysis of past and present observations and scenarios of future developments». Dans: Negm, A. et M.Zeleňáková (édit.), *Water resources in Slovakia: Part II. Climate change, drought and floods*. The Handbook of environmental chemistry, vol. 70. Springer, Berlin Heidelberg, p. 21-47. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-01157-1\\_157](https://doi.org/10.1007/978-3-642-01157-1_157)
- Goulet, F., 1995. *Frost heaving of forest tree seedlings: a review*. *New For.* 9: 67-94. <https://doi.org/10.1007/BF00028927>
- Goulet, F., 2000. *Frost heaving of planted tree seedlings in the boreal forest of northern Sweden*. Licentiate dissertation. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture, Umeå (Suède). Reports, N°. 45. 18 p. <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/20118433>
- Gravel, J., N.Thiffault et G.Prégent, 2016a. *La plantation uniforme de résineux*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers. Fiche d'aide à la décision n°F-010. 4p. [https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/entreprise/plantations\\_uniformes\\_resineux.pdf](https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/entreprise/plantations_uniformes_resineux.pdf)
- Gravel, J., N.Thiffault et G.Prégent, 2016b. *Le regarni et l'enrichissement de résineux*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers. Fiche d'aide à la décision n° F-011. 4 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/entreprise/regarni-et-enrichissement-resineux.pdf>
- Grossnickle, S.C., 1988. *Planting stress in newly planted jack pine and white spruce. I. Factors influencing water uptake*. *Tree Physiol.* 4(1): 71-83. <https://doi.org/10.1093/treephys/4.1.71>

- Grossnickle, S.C., 1993. *Shoot water relations and gas exchange of western hemlock and western red cedar seedlings during establishment on a reforestation site*. *Trees* 7: 148-155.
- Grossnickle, S.C., 2000. *Ecophysiology of northern spruce species: The performance of planted seedlings*. NRC Research Press. xii + 407 p. <https://doi.org/10.1139/9780660179599>
- Grossnickle, S.C., 2005. *Importance of root growth in overcoming planting stress*. *New For.* 30: 273-294. <https://doi.org/10.1007/s11056-004-8303-2>
- Grossnickle, S.C., 2012. *Why seedlings survive: Influence of plant attributes*. *New For.* 43: 711-738. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6>
- Grossnickle, S.C., 2018. *Seedling establishment on a forest restoration site – An ecophysiological perspective*. *Reforesta* 6: 110-139. <http://dx.doi.org/10.21750/REFOR.6.09.62>
- Grossnickle, S.C. et R.S. Folk, 2003. *Spring versus summer spruce stocktypes of western Canada: Nursery development and field performance*. *West. J. Appl. For.* 18(6): 267-275. <http://dx.doi.org/10.1093/wjaf/18.4.267>
- Grossnickle, S.C. et V. Ivetić, 2022. *Root system development and field establishment: Effect of seedling quality*. *New For.* 53: 1021-1067. <http://dx.doi.org/10.1007/s11056-022-09916-y>
- Grossnickle, S.C. et J.E. MacDonald, 2018a. *Why seedlings grow: influence of plant attributes*. *New For.* 49: 1-34. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9606-4>
- Grossnickle, S.C. et J.E. MacDonald, 2018b. *Seedling quality: History, application, and plant attributes*. *Forests* 9(5): 283. <http://dx.doi.org/10.3390/f9050283>
- Grossnickle, S.C. et J.E. McDonald, 2021. *Fall planting in northern forest as a reforestation option: Rewards, risks and biological considerations*. *Tree Planters' Notes* 64: 57-69. <https://rngr.net/publications/tpn/64-2/fall-planting-in-northern-forests-as-a-reforestation-option-rewards-risks-and-biological-considerations>
- Groupe normes DGSPF-RRPSP, 2019. *Guide de terrain : inventaire de qualification des plants résineux cultivés en récipients*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction générale de la production de semences et de plants forestiers. Ouvrage de référence. 115 p. <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/3712127>
- Gubka, K., 2001. «Natural and artificial regeneration in protective forests in the Low Tatra Mts». Dans: Slodičák M., Novák J. (édit.), *Actual problems of silviculture in mountain forests*. Research Institute of Forestry and Wildlife. Strnady, p. 221-230. [en slovaque avec résumé en anglais]
- Guehl, J.M., G. Aussenac et P. Kaushal, 1989. *The effects of transplanting stress on photosynthesis, stomatal conductance and leaf water potential in Cedrus atlantica Manetti seedlings: Role of root regeneration*. *Ann. For. Sci.* 46S: 464-468. <https://doi.org/10.1051/FORREST%3A198905ART0103>
- Guehl, J.M., A. Clement, P. Kaushal, G. Aussenac, 1993. *Planting stress, water status and non-structural carbohydrate concentrations in Corsican pine seedlings*. *Tree Physiol.* 12(2): 173-183. <https://doi.org/10.1093/treephys/12.2.173>
- Hänninen, H., J. Luoranen, R. Rikala, H. Smolander, 2009. *Late termination of freezer storage increases the risk of autumn frost damage to Norway spruce seedlings*. *Silva Fenn.* 43(5): 817-830. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.175>
- Harayama, H., K. Kita, H. Kon, W. Ishizuka, H. Tobita et H. Utsugi. 2016. *Effect of planting season on survival rate, growth and ecophysiological properties of container seedlings of Japanese Larch (Larix kaempferi)*. *J. Jpn. For. Soc.* 98: 158-166. [en japonais avec résumé en anglais] <https://doi.org/10.4005/jjfs.98.158>
- Heiskanen, J., T. Saksa et J. Luoranen, 2013. *Soil preparation method affects outplanting success of Norway spruce container seedlings on till soils susceptible to frost heave*. *Silva Fenn.* 47(1): article id 893. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.893>
- Helenius, P., 2005. *Extension of the planting period of Norway spruce container seedlings: Risks related to the drought-growth stage dynamics and handling practices*. *Dissertationes Forestales* 3. 46 p. <http://dx.doi.org/10.14214/df.3>
- Henneb, M., N. Thiffault et O. Valeria, 2020. *Regional climate, edaphic conditions and establishment substrates interact to influence initial growth of black spruce and jack pine planted in the boreal forest*. *Forests* 11(2): 139. <https://doi.org/10.3390/f11020139>
- Horntvedt, R. et K. Venn, 1980. *Frost injury to Norway spruce during the winter of 1976-1977*. *Eur. J. For. Path.* 10(2-3): 71-77. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1439-0329.1980.tb00011.x>

- livonen, S., R. Rikala, A. Ryyppö et E. Vapaavuori, 1999. *Responses of Scots pine (Pinus sylvestris) seedlings grown in different nutrient regimes to changing root zone temperature in spring*. *Tree Physiol.* 19(14): 951-958. <https://doi.org/10.1093/treephys/19.14.951>
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022. *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge (Royaume-Uni) et New York, NY (États-Unis). 3 056 p. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- Jarvis, P.G., 1975. «Water transfer in plants». Dans: deVries, D.A. et N.H. Afgan. (édit.), *Heat and mass transfer in the plant environment*, Scripta Book Co., Washington, D.C. (États-Unis), p. 369-394.
- Jobidon, R., V. Roy et G. Cyr, 2003. *Net effect of competing vegetation on selected environmental conditions and performance of four spruce seedling stock sizes after eight years in Québec (Canada)*. *Ann. For. Sci.* 60(7): 691-699. <http://dx.doi.org/10.1051/forest:2003063>
- Josefsson, M., 1991. *Plantstorlekens betydelse för tallplantornas etablering på biologiskt skilda ståndorter i Norrland—Resultat efter två tillväxtsåsonger i fält av 'Plantstorleksprojektets' Serie C*. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsproduktion, Stencil 71. [en suédois]
- Kaushal, P., et G. Aussenac, 1989. *Transplanting shock in Corsican pine and Cedar of Atlas seedlings: Internal water deficits, growth and root regeneration*. *For. Ecol. Manage.* 27(1): 29-40. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(89\)90080-7](https://doi.org/10.1016/0378-1127(89)90080-7)
- Kobe, R.K., 1997. *Carbohydrate allocation to storage as a basis of interspecific variation in sapling survivorship and growth*. *Oikos* 80(2): 226-233. <https://doi.org/10.2307/3546590>
- Kramer, P.J., 1986. *The role of physiology in forestry*. *Tree Physiol.* 2(1-2-3): 1-16. <https://doi.org/10.1093/treephys/2.1-2-3.1>
- Krasowski, M. et D.G. Simpson, 2001. «Frost-related problems in the establishment of coniferous forests». Dans: Bigras F.J. et S.J. Colombo. (édit.), *Conifer cold hardiness. Tree physiology, Volume 1*. Springer, Dordrecht (Pays-Bas). p. 253-285. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9650-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9650-3_10)
- Krasowski, M.J., T. Letchford, A. Caputa, W.A. Bergerud et P.K. Ott, 1996. *The susceptibility of white spruce seedlings to overwinter injury and their post-injury field responses*. *New For.* 12: 261-278. <https://doi.org/10.1007/BF00027935>
- Kropp, B.R. et C.-G. Langlois, 1990. *Ectomycorrhizae in reforestation*. *Can. J. For. Res.* 20(4): 438-451. <https://doi.org/10.1139/x90-061>
- Krumlik, G.J., 1984. *Fall planting in the Vancouver forest region. Second approximation guide-lines and review of available information*. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch. Research Report RR-84002-HQ. 32 p.
- Kul, R., M. Ekinci, M. Turan, S. Ors et E. Yildirim, 2020. «How abiotic stress conditions affects plant roots». Dans: Yildirim, E., M. Turan et M. Ekinci (édit.), *Plant Roots*. IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.95286>
- Kuneš, I., M. Baláš, K. Millerová et V. Balcar, 2011. *Introducing of broad-leaved and fir admixture into coniferous stands in the Jizera Mts. Lesnický průvodce 9/2011*. Research Institute of Forestry and Wildlife, Strnady. [en tchèque avec résumé en anglais] [https://www.vulhm.cz/files/uploads/2019/03/LP\\_9\\_2011.pdf](https://www.vulhm.cz/files/uploads/2019/03/LP_9_2011.pdf)
- Lamhamedi, M.S., M. Renaud, P. Desjardins et L. Veilleux, 2009. *Mise à l'échelle opérationnelle du traitement hâtif de jours courts sur la morpho-physiologie et l'insuffisance racinaire des plants d'épinette noire (1+0) produits en tunnel*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 154, 48 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire154.pdf>
- Lamhamedi, M.S., M.-C. Lambert et M. Renaud, 2022. *Simulation of episodic winter warming on dehardening of boreal forest seedlings in northern forest nurseries*. *Forests* 13(12): 1975. <http://dx.doi.org/10.3390/f13121975>
- Landhäuser, S.M., J. Rodriguez-Alvarez, E.H. Marenholtz et V.J. Lieffers, 2012. *Effect of stock type characteristics and time of planting on field performance of aspen (Populus tremuloides Michx.) seedlings on boreal reclamation sites*. *New For.* 43(5-6): 679-693. <http://dx.doi.org/10.1007/s11056-012-9346-4>

- Landis, T.D., R.K. Dumroese et D.L. Haase, 2010. *The container tree nursery manual. Volume 7: Seedling processing, storage, and outplanting*. USDA Forest Service. Washington, DC (États-Unis). Agriculture Handbook N° 674. 199 p. [https://www.fs.usda.gov/rm/pubs\\_series/wo/wo\\_ah674\\_7.pdf](https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_series/wo/wo_ah674_7.pdf)
- Lindström, A. et C. Nyström, 1987. *Seasonal variation in root hardiness of container-grown Scots pine, Norway spruce, and Lodgepole pine seedlings*. Can. J. For. Res. 17(8): 787-793. <http://dx.doi.org/10.1139/x87-126>
- Lindström, A. et E. Stattin, 1994. *Root freezing tolerance and vitality of Norway spruce and Scots pine seedlings: influence of storage duration, storage temperature, and prestorage root freezing*. Can. J. For. Res. 24(12): 2477-2484. <https://doi.org/10.1139/x94-319>
- Lopushinsky, W. et T.A. Max, 1990. *Effect of soil temperature on root and shoot growth and on budburst timing in conifer seedling transplant*. New For. 4: 107-124. <https://doi.org/10.1007/BF00119004>
- Luoranen, J., 2018. *Autumn versus spring planting: the initiation of root growth and subsequent field performance of Scots pine and Norway spruce seedlings*. Silva Fenn. 52(2): article id 7813. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.7813>
- Luoranen, J. et R. Rikala, 2013. *Field performance of Scots pine (Pinus sylvestris L.) seedlings planted in disc trenched or mounded sites over an extended planting season*. New For. 44(2): 147-162. <http://dx.doi.org/10.1007/s11056-012-9307-y>
- Luoranen, J. et R. Rikala, 2015. *Post-planting effects of early-season short-day treatment and summer planting on Norway spruce seedlings*. Silva Fenn. 49(1): article id 1300. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1300>
- Luoranen, J., R. Rikala, K. Konttinen et H. Smolander, 2005. *Extending the planting period of dormant and growing Norway spruce container seedlings to early summer*. Silva Fenn. 39(4): 481-496. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.361>
- Luoranen, J., R. Rikala, K. Konttinen et H. Smolander, 2006. *Summer planting of Picea abies container-grown seedlings: effects of planting date on survival, height growth and root egress*. For. Ecol. Manage. 237(1-3): 534-544. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.073>
- Luoranen, J., P. Helenius, L. Huttunen et R. Rikala, 2007. *Short-day treatment enhances root egress of summer-planted Picea abies seedlings under dry conditions*. Scand. J. For. Res. 22(5): 384-389. <http://dx.doi.org/10.1080/02827580701551382>
- Luoranen, J., R. Rikala et H. Smolander, 2011. *Machine planting of Norway spruce by Bracke and Eco-planter: An evaluation of soil preparation, planting method and seedling performance*. Silva Fenn. 45(3): 341-357. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.107>
- Luoranen, J., T. Saksa et J. Lappi, 2018. *Seedling, planting site and weather factors affecting the success of autumn plantings in Norway spruce and Scots pine seedlings*. For. Ecol. Manage. 419-420: 79-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.040>
- Luoranen, J., L. Pikkarainen, M. Poteri, H. Peltola et J. Riikonen, 2019. *Duration limits on field storage in closed cardboard boxes before planting of Norway spruce and Scots pine container seedlings in different planting seasons*. Forests 10(12): 1126. <http://dx.doi.org/10.3390/f10121126>
- Luoranen, J., J. Riikonen et T. Saksa, 2022. *Factors affecting winter damage and recovery of newly planted Norway spruce seedlings in boreal forests*. For. Ecol. Manage. 503: 119759. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119759>
- Luoranen, J., J. Riikonen et T. Saksa, 2023. *Damage caused by an exceptionally warm and dry early summer on newly planted Norway spruce container seedlings in Nordic boreal forests*. For. Ecol. Manage. 528: 120649. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120649>
- Mäkelä, A., P. Hari, F. Berninger, H. Hänninen et E. Nikinmaa, 2004. *Acclimation of photosynthetic capacity in Scots pine to the annual cycle of temperature*. Tree Physiol. 24(4): 369-376. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/24.4.369>
- Margolis, H.A. et D.G. Brand, 1990. *An ecophysiological basis for understanding plantation establishment*. Can. J. For. Res. 20(4): 375-390. <https://doi.org/10.1139/x90-056>
- Marquis, B., Y. Bergeron, D. Houle, M. Leduc et S. Rossi, 2022. *Variability in frost occurrence under climate change and consequent risk of damage to trees of western Quebec, Canada*. Sci. Rep. 12: 7220. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-022-11105-y>

- Martel, M.C., H.A. Margolis, C. Coursolle, F.J. Bigras et F.A. Heinsch et S.W. Running, 2005. *Decreasing photosynthesis at different spatial scales during the late growing season on a boreal cutover*. *Tree Physiol.* 25(6): 689-699. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/25.6.689>
- Mattsson, A., 1986. *Seasonal variation in root growth capacity during cultivation of container grown Pinus sylvestris seedlings*. *Scand. J. For. Res.* 1(1-4): 473-482. <https://doi.org/10.1080/02827588609382438>
- McDowell, N., W.T. Pockman, C.D. Allen, D.D. Breshears, N. Cobb, T. Kolb, J. Plaut, J. Sperry, A. West, D.G. Williams et E.A. Yezzer, 2008. *Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought?* *New Phytol.* 178(4): 719-739. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x>
- Miller, D.L., 1981. *Can we fall plant white pine?* Potlatch Corporation. Forestry Research Note RN-81-6. Lewiston, ID (États-Unis). 7 p.
- Miller, D.L., 1982. *Can we fall plant Engelmann spruce and western redcedar?* Potlatch Corporation, Forestry Research Note RN-82-1. Lewiston, ID (États-Unis). 5 p.
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2016. *Qualité des plantations — Guide de l'évaluateur — 2016*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, 35 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/guide-evaluateur-qualite-plantations.pdf>
- [MRN] Ministère des Ressources naturelles, 1994. *Aménager pour mieux protéger les forêts : une stratégie*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction des programmes forestiers, Publication FQ94-3051. 197 p.
- Mullin, R.E., 1968. *Comparisons between seedlings and transplants in fall and spring transplants*. Ontario Department of Lands and Forest Research. Report N° 85., 40 p.
- Narimatsu, M., T. Yagi et M. Noguchi, 2016. *The influence of planting date on survival and growth of Larix kaempferi containerized seedlings*. *J. Jpn. For. Soc.* 98(4): 167-175. [en Japonais avec résumé en anglais] <http://dx.doi.org/10.4005/jjfs.98.167>
- Niinemets, Ü., 2010. *Responses of forest trees to single and multiple environmental stresses from seedlings to mature plants: past stress history, stress interactions, tolerance and acclimation*. *For. Ecol. Manage.* 260(10): 1623-1639. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.054>
- Nilsson, U., J. Luoranen, T. Kolström, G. Örlander et P. Puttonen, 2010. *Reforestation with planting in northern Europe*. *Scand. J. For. Res.* 25(4): 283-294. <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2010.498384>
- Noland, T.L., G.H. Mohammed et M. Scott, 1997. *The dependence of root growth potential on light level, photosynthetic rate, and root starch content in jack pine seedlings*. *New For.* 13: 105-119. <https://doi.org/10.1023/A%3A1006517820981>
- Nyström, C., 1991. *Rottillväxkapacitet hos tall (Pinus sylvestris) och gran (Picea abies)—naturlig variation över året inverkan av olika produktionsuppläggningar och samspel med resultat i fält*. Sveriges Lantbruks universitet Institution för Skogsproduktion, Stencil 76. [en suédois]
- Örlander, G. et K. Due, 1986. *Location of hydraulic resistance in the soil-plant pathway in seedlings of Pinus sylvestris L. grown in peat*. *Can. J. For. Res.* 16(1): 115-123. <http://dx.doi.org/10.1139/x86-019>
- Örlander, G., P. Gemmel et J. Hunt, 1990. *Site preparation: A Swedish overview*. FRDA Rep. N°. 105. Victoria, C.-B. vi + 62 p.
- Pagter, M. et R. Arora, 2013. *Winter survival and deacclimation of perennials under warming climate: Physiological perspectives*. *Physiol. Plant.* 147(1): 75-87. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01650.x>
- Philipson, J.J., 1988. *Root growth in Sitka spruce and Douglas-fir transplants: Dependence on the shoot and stored carbohydrates*. *Tree Physiol.* 4(2): 101-108. <https://doi.org/10.1093/treephys/4.2.101>
- Pikkarainen, L., J. Luoranen, A. Kilpeläinen, T. Oijala et H. Peltola., 2020. *Comparison of planting success in one-year-old spring, summer and autumn plantings of Norway spruce and Scots pine under boreal conditions*. *Silva Fenn.* 54(1): article id 10243. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.10243>
- Perkins, T.D., G.T. Adams et R.M. Klein, 1991. *Desiccation of freezing? Mechanisms of winter injury to red spruce foliage*. *Am. J. Bot.* 78(9): 1207-1217. <https://doi.org/10.1002/J.1537-2197.1991.TB11414.X>

- Policelli, N., T.R. Horton, A.T. Hudon, T.R. Patterson et J.M. Bhatnagar, 2020. *Back to roots: The role of ectomycorrhizal fungi in boreal and temperate forest restoration*. *Front. For. Glob. Change* 3: 97. <http://dx.doi.org/10.3389/ffgc.2020.00097>
- Prévost, M., 1992. *Effets du scarifiage sur les propriétés du sol, la croissance des semis et la compétition : revue des connaissances actuelles et perspectives de recherches au Québec*. *Ann. For. Sci.* 49(3) : 277-296. <https://doi.org/10.1051/forest:19920306>
- Prévost, M., 1996. *Effets du scarifiage sur les propriétés du sol et l'ensemencement naturel dans une pessière noire à mousses de la forêt boréale québécoise*. *Can. J. For. Res.* 26(1) : 72-86. <https://doi.org/10.1139/X26-008>
- Prévost, M., 1997. *Effects of scarification on seedbed coverage and natural regeneration after a group seed-tree cutting in a black spruce (Picea mariana) stand*. *For. Ecol. Manage.* 94(1-3):219-231. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03955-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03955-2)
- Prévost, M. et N. Thiffault, 2013. « Chapitre 8 — La préparation de terrain ». Dans : Ministère des Ressources naturelles (édit.), *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2 — Les concepts et l'application de la sylviculture*. Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.P. Saucier, Les Publications du Québec, p. 134-157.
- Puttonen, P., 1986. *Carbohydrate reserves in Pinus sylvestris seedling needles as an attribute of seedling vigor*. *Scand. J. For. Res.* 1(1-4): 181-193. <http://dx.doi.org/10.1080/02827588609382410>
- Rantala, J., P. Harstela, V.-M. Saarinen et L. Tervo, 2009. *A techno-economic evaluation of Bracke and M-Planter tree planting devices*. *Silva Fenn.* 43(4): 659-667. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.186>
- Reicis, K., R.L. Bradley, G. Joanisse, N. Thiffault, D. Scott et W.F.J. Parsons, 2023. *Mechanical scarification can reduce competitive traits of boreal ericaceous shrubs and improve nutritional site quality*. *Forestry* 96(2): 293-303. <http://dx.doi.org/10.1093/forestry/cpac047>
- Repáč, I., A. Tučeková, I. Sarvašová et J. Vencurik, 2011. *Survival and growth of outplanted seedlings of selected tree species on the High Tatra Mts. windthrow area after the first growing season*. *J. For. Sci.* 57(8): 349-358. <https://doi.org/10.17221/130%2F2010-JFS>
- Repáč, I., M. Sendecký et Z. Parobeková, 2016. «*Effects of hydrogels and planting time on Norway spruce and Scots pine plantations development on planting site in the Strážovské vrchy. Mts.*». Dans: Kacálek D. et al. (édit.), *Forest functions in changing environments*. Research Institute of Forestry and Wildlife. Strnady, p. 37-42. [en slovaque avec résumé en anglais]
- Repáč, I., Z. Parobeková et M. Sendecký, 2017. *Reforestation in Slovakia: History, current practice and perspectives*. *Reforesta* 3: 53-88. <http://dx.doi.org/10.21750/REFOR.3.07.31>
- Repáč, I., M. Belko, D. Krajmerova et L. Paule, 2021. *Planting time, stocktype and additive effects on the development of spruce and pine plantations in Western Carpathian Mts*. *New For.* 52: 449-472. <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09804-3>
- Ritchie, G.A., 1982. *Carbohydrate reserves and root growth potential in Douglas-fir seedlings before and after cold storage*. *Can. J. For. Res.* 12(4): 905-912. <http://dx.doi.org/10.1139/x82-132>
- Ritchie, G.A. et J.R. Dunlap, 1980. *Root growth potential: Its development and expression in forest tree seedlings*. *New Zeal. J. For. Sci.* 10(1): 218-248. [https://www.scionresearch.com/\\_data/assets/pdf\\_file/0019/36811/NZJFS1011980RITCHIE218\\_248.pdf](https://www.scionresearch.com/_data/assets/pdf_file/0019/36811/NZJFS1011980RITCHIE218_248.pdf)
- Royo, A.A., P. Raymond, C.C. Kern, B.T. Adams, D. Bronson, E. Champagne, D. Dumais, E. Gustafson, P.E. Marquardt, A.M. McGraw, J.R. Miesel, A.D. Munson, C. Périé, F.J. Tavares Moreira, A. Ola, M. Bouchard et J.-F. Bissonnette, 2023. *Desired REgeneration through Assisted Migration (DREAM): Implementing a research framework for climate-adaptive silviculture*. *For. Ecol. Manage.* 546(1): 121298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121298>
- Running, S.W. et C.P. Reid, 1980. *Soil temperature influences on root resistance of Pinus contorta seedlings*. *Plant Physiol.* 65(4): 635-640. <http://dx.doi.org/10.1104/pp.65.4.635>
- Ruosteenoja, K., T. Markkanen, A. Venäläinen, P. Räisänen et H. Peltola, 2018. *Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21<sup>st</sup> century*. *Clim. Dyn.* 50: 1177-1192. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3671-4>

- Sahlén, K. et F. Goulet, 2002. *Reduction of frost heaving of Norway spruce and Scots pine seedlings by planting in mounds or in humus*. New For. 24(3): 175-182. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1021378228524>
- Sakai, A. et W. Larcher, 1987. *Frost survival of plants: Responses and adaptation to freezing*. Ecological Studies 62. Springer Berlin, Heidelberg (Allemagne). 321 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-71745-1>
- Sánchez-González, M., G. Gea-Izquierdo, F. Pulido, V. Acácio, D. McCreary et I. Cañellas, 2016. «Chapter 19. Restoration of open oak woodlands in Mediterranean ecosystems of Western Iberia and California». Dans: Stanturf, J.A., 2015 (édit.), *Restoration of boreal and temperate forests. 2<sup>nd</sup> edition*. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL (États-Unis). p. 377-399.
- Schwan, T., 1994. *Planting depth and its influence on survival and growth: A literature review with emphasis on jack pine, black spruce, and white spruce*. Northeast Science and Technology, Ontario, Canada. Northeast Science and Technology Technical Report TR-01. 35 p.
- Shaw III, C.G., R.C. Sidle et A.S. Harris, 1987. *Evaluation of planting sites common to a south-east Alaska clear-cut. III. Effects of microsite type on ectomycorrhizal inoculation on growth and survival of Sitka spruce seedlings*. Can. J. For. Res. 17(4): 334-339. <https://doi.org/10.1139/x87-056>
- Silim, S.N. et D.P. Lavender, 1994. *Seasonal patterns and environmental regulation of frost hardiness in shoots of seedlings of Thuja plicata, Chamaecyparis nootkatensis, and Picea glauca*. Can. J. Bot. 72(3): 309-316. <http://dx.doi.org/10.1139/b94-040>
- Sinclair, C. et R.J. Boyd, 1973. *Survival comparisons of three fall and spring plantings of four coniferous species in northern Idaho*. Intermountain Forest and Range Experiment Station, USDA Forest Service. Research Paper INT-139. 23 p.
- South, D.B. et J.L. Rakestraw, 2004. *Large-diameter seedlings: A method of reducing chemical use in some pine plantations*. J. Sustain. For. 18(4): 47-58. [https://doi.org/10.1300/J091v18n04\\_03](https://doi.org/10.1300/J091v18n04_03)
- South, D.B., S.W. Harris, J.P. Barnett, M.J. Hains et D.H. Gjerstad, 2005. *Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of Pinus palustris seedlings in Alabama, USA*. For. Ecol. Manage. 204(2-3): 385-398. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004.09.016>
- Starkey, T.E., S.A. Enebak et D.B. South, 2015. *Forest seedling nursery practices in the southern United States: container nurseries*. Tree Planters' Notes. 58(1): 18-26. <https://rngr.net/publications/tpn/58-1/forest-seedling-nursery-practices-in-the-southern-united-states-container-nurseries>
- Stewart, J.D. et P.Y. Bernier, 1995. *Gas exchange and water relations of 3 sizes of containerized Picea mariana seedlings subjected to atmospheric and edaphic water stress under controlled conditions*. Ann. For. Sci. 52(1): 1-9. <http://dx.doi.org/10.1051/forest:19950101>
- Stinziano, J.R. et D.A. Way, 2017. *Autumn photosynthetic decline and growth cessation in seedlings of white spruce are decoupled under warming and photoperiod manipulations*. Plant Cell Environ. 40(8): 1296-1316. <http://dx.doi.org/10.1111/pce.12917>
- Sutherland, B. et F.F. Foreman, 2000. *Black spruce and vegetation response to chemical and mechanical site preparation on a boreal mixedwood site*. Can. J. For. Res. 30(10): 1561-1570. <http://dx.doi.org/10.1139/cjfr-30-10-1561>
- Taylor, M., D.L. Haase et R.L. Rose, 2009. *Fall planting and tree shelters for reforestation in the east Washington cascades*. West. J. Appl. For. 24(4): 173-179. <http://dx.doi.org/10.1093/wjaf/24.4.173>
- Thiffault, N. et F. Hébert, 2013. « Chapitre 13 — Le dégagement et le nettoyage ». Dans : Ministère des Ressources naturelles (édit.), *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2 — Les concepts et l'application de la sylviculture*. Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.P. Saucier. Les Publications du Québec. p. 244-271.
- Thiffault, N. et V. Roy, 2011. *Living without herbicides in Québec (Canada): Historical context, current strategy, research and challenges in forest vegetation management*. Eur. J. For. Res. 130(1): 117-133. <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-010-0373-4>
- Thiffault, N., V. Roy, J. Ménérier, G. Prigent et A. Rainville, 2013. « Chapitre 11 — La plantation ». Dans : Ministère des Ressources naturelles (édit.), *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2 — Les concepts et l'application de la sylviculture*. Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.P. Saucier. Les Publications du Québec, p. 196-225.

- Thiffault, N., R. Jobidon et A.D. Munson, 2014. *Comparing large containerized and bareroot conifer stock on sites of contrasting vegetation composition in a non-herbicide scenario*. *New For.* 45(6): 875-891. <http://dx.doi.org/10.1007/s11056-014-9443-7>
- van den Driessche, R., 1987. *Importance of current photosynthate to new root growth in planted conifer seedlings*. *Can. J. For. Res.* 17(8): 776-782. <https://doi.org/10.1139/X87-124>
- Vapaavuori, E.M., R. Rikala et A. Ryyppö, 1992. *Effects of root temperature on growth and photosynthesis in conifer seedlings during shoot elongation*. *Tree Physiol.* 10(3): 217-230. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/10.3.217>
- Venäläinen, A., I. Lehtonen, M. Laapas, K. Ruosteenoja, O.-P. Tikkanen, H. Viiri, V.-P. Ikonen, et H. Peltola, 2020. *Climate change induces multiple risks to boreal forests and forestry in Finland: A literature review*. *Glob. Change Biol.* 26(8): 4178-4196. <https://doi.org/10.1111%2Fgcb.15183>
- Wallertz, K., K.H. Hansen, K. Hjelm, I.S. Fløistad, 2016. *Effect of planting time on pine weevil (Hylobius abietis) damage to Norway spruce seedlings*. *Scand. J. For. Res.* 313(3): 262-270. <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1125523>
- Walstad, J.D. et P.J. Kuch, 1987. *Forest vegetation management for conifer production*. John Wiley & Sons. New York, NY (États-Unis). 523 p.
- Webb, D.P., 1976. *Root growth in Acer saccharum Marsh. seedlings: Effects of light intensity and photoperiod on root elongation rates*. *Bot. Gaz.* 137(3): 211-217. <https://doi.org/10.1086/336860>
- Winjum, J.K., 1963. *Effects of lifting date and storage on 2+0 Douglas-fir and Noble fir*. *J. For.* 61(9): 648-654. <https://doi.org/10.1093/jof/61.9.64>

La Direction de la recherche forestière a pour mandat de participer activement à l'orientation de la recherche et à l'amélioration de la pratique forestière au Québec, dans un contexte d'aménagement forestier durable, en réalisant des travaux de recherche scientifique appliquée. Elle développe de nouvelles connaissances, du savoir-faire et du matériel biologique et contribue à leur diffusion ou leur intégration au domaine de la pratique. Elle subventionne aussi des recherches en milieu universitaire, le plus souvent dans des créneaux complémentaires à ses propres travaux.

On peut citer ce texte en indiquant la référence.

Citation recommandée :

Dumais, D., J. Gravel, É. Boileau, P. Descôtes, C. Georlette, S. Houde et M.-E. Tremblay, 2024. *État des connaissances et effets anticipés au Québec de la mise en terre tardive de plants forestiers résineux produits en récipients : revue de littérature et analyse*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 164, 28 p.

ISSN 0834-4833

ISBN (PDF) : 978-2-550-98458-0

G.F.D.C. : 232.44 : 174.7 (714)

L.C. : SD 410.38

Dépôt légal 2024

Bibliothèque nationale du Québec

© 2024 Gouvernement du Québec

**Ressources naturelles  
et Forêts**

Québec 