

Avis technique

SGEF-27

Direction de la recherche forestière

Titre :	La face cachée de la silice de mauvaise qualité : diagnostic et conséquences sur la qualité morphophysiological des plants dans les pépinières forestières au Québec
Auteurs :	Mohammed S. Lamhamedi et Mario Renaud
Collaborateurs :	Carol De Blois, Denis Langlois, Sylvie Goulet, Nancy Tanguay, Pierre Comtois
Équipe technique :	Mario Renaud, Pascal Desjardins
Date :	Mars 2022

Depuis environ 2010, plusieurs pépinières forestières du Québec sont confrontées à un grave problème qui engendre de fortes réductions de la germination des semences et une variabilité de la croissance des plants (parties aériennes et racines). Lorsque ces symptômes se manifestent, le lot entier risque d'être perdu, car les plants ne rencontreront pas les normes morphophysiological de qualification pour le reboisement. Cet avis technique présente un diagnostic découlant de résultats obtenus à différentes échelles (en pépinière et dans des dispositifs expérimentaux en tunnel et en conditions contrôlées) pour trouver la cause principale, puis propose des recommandations opérationnelles à la portée du pépiniériste.



Exemple de la variabilité observée dans un même tunnel au sein d'un même lot de plants d'épinette noire pendant la première saison de croissance (1+0).



Croissance retardée des parties aériennes et absence de racines principales chez des plants 1+0 d'épinette blanche cultivés dans des cavités recouvertes d'une silice de mauvaise qualité (à gauche), par rapport à celle de plants normaux recouverts avec de la silice de bonne qualité (à droite).

On peut citer tout ou partie de ce texte en indiquant la référence
Gouvernement du Québec

ISBN : 978-2-550- 91509-6

1. Problématique

Au Québec, la production de plants forestiers se fait après l'octroi de contrats par le gouvernement du Québec aux pépiniéristes forestiers. Ceux-ci demeurent responsables de tous les itinéraires techniques entourant les régies de production de plants forestiers selon les gabarits visés et l'essence, notamment le choix du matériau de recouvrement des semences, l'irrigation, la fertilisation, la protection phytosanitaire etc. Plusieurs pépiniéristes ont cherché des options pour remplacer la silice (SiO_2) pour recouvrir les semences. En effet, la rareté de ce matériau rend difficile l'approvisionnement à un coût raisonnable, ce qui oblige certains pépiniéristes à importer la silice de la province voisine du Nouveau-Brunswick (Canada). Les pépiniéristes forestiers utilisent et évaluent donc en continu différents matériaux de recouvrement (calcite, gravier, granite, billes de polystyrène, petites pierres ou sable grossier de rivière, etc.) (Gingras 2011) en vue d'améliorer l'environnement physique et la germination des semences ainsi que la croissance des plants (figure 1). Sur le marché québécois et canadien, on trouve de la calcite granulaire (CaCO_3) et de la silice de différentes couleurs (blanche, beige, rose, etc.), selon la composition de la roche mère.

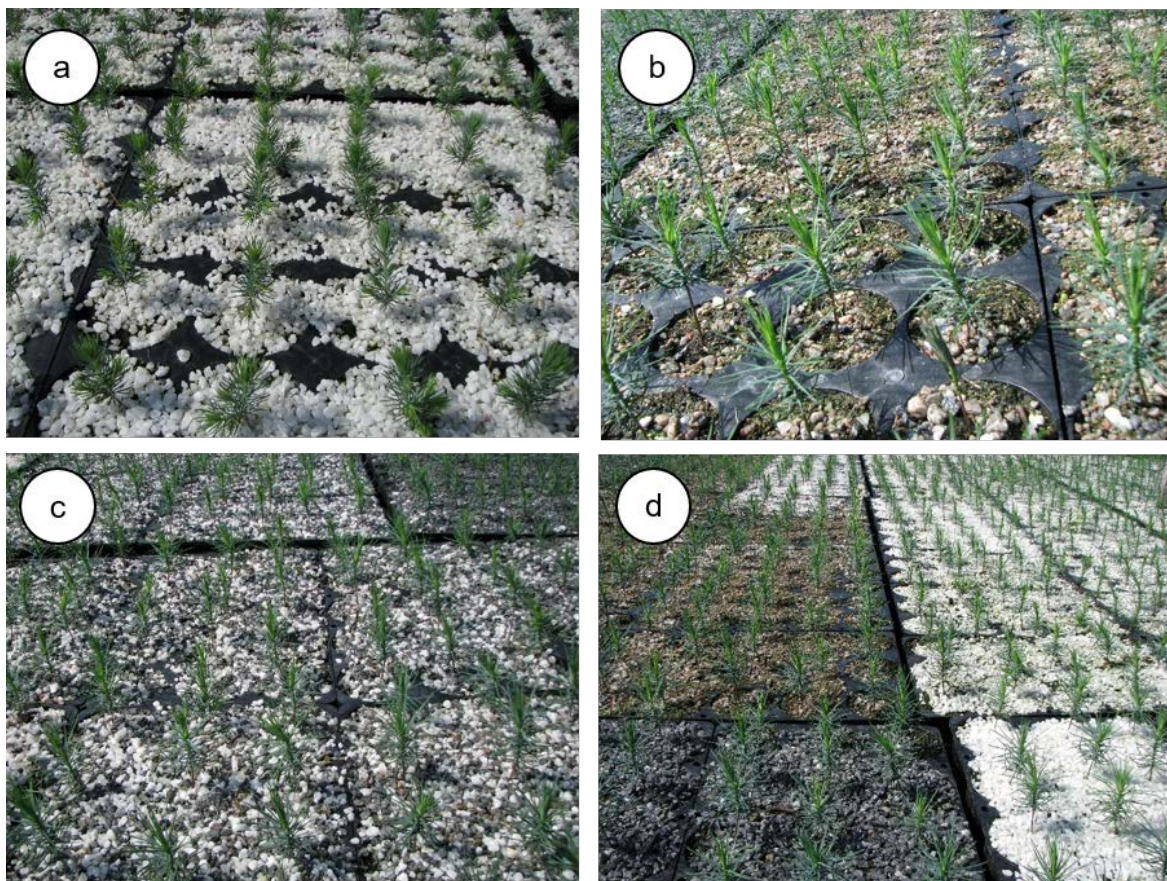


Figure 1. Exemples de matériaux de recouvrement utilisés et évalués dans les pépinières forestières du Québec [a) Silice blanche; b) gravier de rivière lavé; c) mélange de gravier noir et de silice]; d) test d'évaluation des différentes combinaisons de matériaux de recouvrement.

Depuis environ 2010, plusieurs pépinières forestières privées et publiques de la province du Québec ont été confrontées à un grave problème que nous attribuons à l'utilisation de silice de mauvaise qualité, engendrant de fortes réductions localisées (parfois à l'échelle de plusieurs tunnels) de la germination des semences et de la croissance des parties aériennes et des racines des plants (Lamhamedi 2013). Lorsque ces symptômes se manifestent, il est déjà trop tard pour intervenir. Le lot entier de plants risque alors d'être perdu, car ceux-ci ne rencontreront pas les normes et critères morphophysologiques de qualification pour la livraison au reboisement. À titre d'exemple, nous avons observé que la hauteur des plants de fortes dimensions (PFD) d'épinette blanche 2+0 (*Picea glauca* (Moench) Voss) dans certains lots problématiques ne dépassait pas 10 à 15 cm à la fin de la 2^e saison de croissance, ce qui est bien en deçà de la cible de 35 cm. De surcroît, la cohésion des carottes racinaires était faible. Ces problèmes n'ont pu être corrigés par les ajustements techniques effectués par les pépiniéristes (irrigation, fertilisation, etc.) (Lamhamedi 2015). Lorsqu'une silice de bonne qualité ou de la calcite granulaire étaient utilisées comme matériaux de recouvrement (Lamhamedi *et al.* 2020a, 2020b, 2021), de tels problèmes de croissance des racines et des parties aériennes n'ont pas été observés.

Au départ, les pépiniéristes avaient émis différentes hypothèses pour expliquer la faible croissance des racines et des parties aériennes des plants, notamment :

- un coup de chaleur, un stress hydrique et une augmentation des températures extrêmes responsables de l'atrophie racinaire dans un contexte de changements climatiques (hypothèse véhiculée par le plus grand nombre de pépiniéristes);
- un problème associé aux propriétés physicochimiques du substrat, comme le pH (hypothèse véhiculée par plusieurs pépiniéristes);
- une mauvaise qualité de la tourbe ou un problème de densité d'empotage;
- le lot de semences lui-même : génétique (provenance) et qualité;
- un effet « loupe » de la silice blanche qui nuit à la croissance des racines;
- un manque d'uniformité dans les régies d'irrigation ou de fertilisation).

Devant cette situation devenue très préoccupante et qui menaçait la rentabilité même de certaines pépinières, les gestionnaires de la Direction générale de la production de semences et de plants forestiers (DGSPF) du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) et les responsables de la majorité des pépinières forestières privées et publiques touchées par ce problème ont sollicité l'aide de l'équipe de recherche en production de plants de la Direction de la recherche forestière (DRF) du MFFP, lui demandant de poser un diagnostic précis et de formuler des recommandations.

En visitant plusieurs pépinières forestières privées et publiques, nous avons constaté, dans un même tunnel, la présence de zones clairement délimitées associées à des variations marquées de croissance chez les plants de plusieurs essences résineuses (épinette noire [*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.], épinette rouge [*Picea rubens* Sarg.], épinette blanche, etc.). Ces variations étaient observables dans une même culture, et même, entre des récipients contigus qui s'étaient suivis sur la chaîne d'empotage. Nous en avons observé dans des secteurs sous tunnel (1+0) ou à l'extérieur (2+0) regroupant plusieurs centaines,

voire plusieurs milliers de récipients. De toute évidence, de tels motifs de répartition des variations ne pouvaient pas être causés par un manque d'uniformité des variables environnementales ou des régies de culture (irrigation, fertilisation, composition et propriétés physicochimiques du substrat, etc.). Dans d'autres pépinières, un retard de croissance et une mauvaise qualité morphophysologique des plants ont été observés dans la majorité de la production, avec des pertes touchant plusieurs lots de plants.

À la lumière de ces observations, nous avons supposé que la variabilité observée pouvait être causée par l'utilisation de silice de qualité variable. Certains pépiniéristes étaient sceptiques face à cette hypothèse, car *a priori*, la silice est un composé inerte sur le plan chimique. Pour approfondir notre investigation, nous avons fait analyser plusieurs échantillons de silice au laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRF du MFFP, en ayant recours à de nouvelles techniques d'analyse et de traitement des échantillons. Nous avons aussi installé des dispositifs expérimentaux en pépinière et en laboratoire en conditions contrôlées afin de vérifier, d'une part, la stabilité des symptômes observés, et d'autre part, les effets négatifs sur la germination et la croissance des plants qu'entraîne l'utilisation d'une silice de mauvaise qualité.

Après avoir ainsi établi notre diagnostic, nous avons réalisé 4 activités d'accompagnement, de transfert de connaissances et d'expertise auprès des pépiniéristes et des gestionnaires des pépinières publiques (Lamhamedi 2014a, 2014b, Lamhamedi 2015, Lamhamedi 2022). Depuis, certaines de nos recommandations concernant l'achat de silice sont en application par les pépinières forestières publiques et celles de l'Office de production de plants forestiers du Québec.

À notre connaissance, aucune autre publication dans la littérature technique et scientifique sur la production de plants forestiers ne caractérise les propriétés chimiques de la silice de mauvaise qualité ni les répercussions de son utilisation sur la croissance des plants à une échelle opérationnelle. Ainsi, ce document vise principalement à :

- i) établir un diagnostic et documenter les symptômes associés à l'utilisation de silice de qualité et de composition chimique variable, de même que les effets observés sur la croissance des plants dans les pépinières forestières du Québec;
- ii) quantifier les effets négatifs de l'utilisation d'une silice de mauvaise qualité sur la germination, le taux d'occupation des cavités et la croissance des racines et des parties aériennes des plants d'épinette noire et blanche (1+0) en pépinière forestière;
- iii) reproduire, en conditions contrôlées à l'aide d'un germeoir, les effets négatifs de la silice de mauvaise qualité sur l'atrophie et la mortalité des apex des racines principales pendant la phase de germination de l'épinette noire et de l'épinette blanche;
- iv) faire des recommandations pour guider les pépiniéristes forestiers et définir des critères physicochimiques mesurables qui pourront être utilisés lors d'appels d'offres pour l'achat de la silice afin de faciliter la prise de décision.

2. Matériel et méthodes

2.1. Observations en pépinière

Nous avons visité différentes pépinières forestières privées et publiques au Québec touchées par ce problème afin de mieux documenter cette problématique de croissance des plants reliée à la qualité de silice. Des échantillons de silice que nous soupçonnions être de bonne et de mauvaise qualité ont été collectés et analysés au laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRF du MFFP à l'aide de différentes nouvelles techniques d'analyse et de traitement des échantillons. Différentes pépinières ont aussi fourni des photos de plants à différents stades de croissance (1+0 et 2+0). Des récipients de plants représentatifs des 2 types de recouvrement (silice de bonne ou de mauvaise qualité) ont aussi été analysés au laboratoire de morphologie de la DRF (prise de photos, architecture des racines, etc.).

2.1.1. Analyse d'échantillons de plusieurs lots de silice en vrac

Des échantillons ont été prélevés directement dans les sacs de plusieurs lots de silice en vrac afin d'en mesurer les propriétés chimiques initiales. Nous avons choisi de ne pas prélever la silice directement dans les cavités des récipients, car le contact silice-tourbe, la présence de semences ou de plants, les irrigations, les fertilisations, les pesticides, les exsudats racinaires et la solution du substrat peuvent en modifier les caractéristiques. De plus, l'analyse de la silice en vrac répondait à notre objectif de trouver des variables facilement mesurables avant l'achat et l'utilisation de la silice, au lieu de plus tard, lorsque des dégâts sont observés en pépinière et que la composition chimique de la silice dans les cavités des récipients a été modifiée par différents contaminants chimiques.

Au cours de plusieurs saisons de croissance, nous avons prélevé aléatoirement de 3 à 10 échantillons composites de silice, chacun constitué d'au moins 3 sous-échantillons, et ce, dans chacune des 7 pépinières participantes. L'effort d'échantillonnage a été guidé par le nombre de lots de silice soupçonnés comme étant problématiques par chaque pépiniériste ainsi que par les quantités disponibles. Les échantillons de silice ont ensuite été traités en laboratoire (tableau 1) afin de libérer tous les éléments chimiques adsorbés à la surface des grains et contenus dans les interstices entre ceux-ci. À chaque étape, ils ont été analysés par le laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRF, avec approbation des résultats par un chimiste.

Tableau 1. Étapes de traitement des échantillons de silice en vrac et modalités de leur analyse chimique à chaque étape.

Étape	Échantillon	Variables analysées
Avant lavage (aucun traitement)	10 g de silice/20 ml d'eau déionisée	<ul style="list-style-type: none"> • pH_{eau}, pH_{CaCl_2},
Eau de lavage	25 g de silice/100 ml d'eau déionisée	<ul style="list-style-type: none"> • Conductivité électrique • Concentrations en P, K, Ca, Mg, Mn, Cu, Zn, Al, Fe, Mo, Na, B et S
Silice lavée avec 500 ml d'eau	10 g de silice/20 ml d'eau déionisée	
Après lavage dans 100 ml de HCl (0,01 M)	25 g de silice rincée avec 500 ml d'eau déionisée	<ul style="list-style-type: none"> • pH_{eau}, pH_{CaCl_2} • Concentrations en métaux (Fe, Cu, Zn, Al, Mg, Mn, B et Mo)

2.1.2 Analyse d'échantillons obtenus d'un fournisseur avant l'achat d'un lot de silice

En 2016, un pépiniériste du Québec nous a contactés pour l'assister et l'accompagner lors de l'achat de silice. De la part de son fournisseur, nous avons reçu 6 échantillons composites et représentatifs du lot de silice. Chaque échantillon composite était constitué de 6 sous-échantillons prélevés dans des tas de silice différents. Tous les échantillons ont été traités et analysés de la même manière que les lots que nous avons échantillonnés nous-mêmes en pépinière. La granulométrie des différents échantillons a été déterminée au laboratoire de la DRF selon l'approche décrite par Lamhamedi et al. (2020a, 2020b). Les modalités de traitement et le certificat des résultats d'analyse sont indiqués en annexe.

2.2. Dispositif expérimental en pépinière

Des graines d'épinette noire (lot de semences : EPN-V2-PLU-1-0; code de culture GI11EPN13-E60) et d'épinette blanche (lot de semences : provenance : EPB-V1-FAL-1-0; code de culture : GI11EPB13-B23) ont été ensemencées dans des récipients 45-110 (IPL, Saint-Damien, Québec, Canada; 45 cavités, 110 cm³/cavité) dont les cavités étaient remplies d'un substrat à base de tourbe (100 %) relativement humide (18 % v/v, eau/substrat) et ajusté à une densité moyenne de 0,09 g/cm³. Les récipients ont été installés vers la mi-avril 2013 dans une serre chauffée de la pépinière forestière privée de Girardville (latitude : 49° 01' 06" N.; longitude : 72° 30' 42" O.).

Pour chaque essence, nous avons évalué les effets de 2 traitements (T1 = calcite granulaire; T2 = silice soupçonnée d'être de « mauvaise qualité »). Nous avons opté pour la calcite granulaire comme matériau de recouvrement pour le traitement témoin afin de nous assurer d'avoir une bonne germination et une croissance normale des parties aériennes et racinaires des plants lors de leur première (1+0) et de leur deuxième (2+0) saison de croissance (Lamhamedi *et al.* 2020a, 2020b, 2021). Lors de l'installation de ce

dispositif, nous n'avons pas encore déterminé les paramètres physicochimiques permettant de distinguer la silice de bonne ou de mauvaise qualité.

Le dispositif expérimental de chaque essence comptait 200 récipients (9 000 plants) et occupait la moitié de la serre. Les traitements ont été répartis de façon aléatoire dans 5 blocs complets contenant chacun 20 récipients/traitement/essence.

Après avoir déterminé la précision du semoir (épinette blanche : 1,32 semence/cavité; épinette noire : 1,26 semence/cavité) selon la méthode opérationnelle utilisée par les pépiniéristes (récipient vide couvert par un tissu blanc pour bien distinguer les semences et faciliter leur comptage), nous avons suivi la germination en réalisant des dénombrements 3 fois par semaine (les lundis, mercredis et vendredis) dans 4 récipients (180 cavités) choisis aléatoirement dans chaque traitement et chaque bloc, pour un total de 20 récipients/traitement/essence. Le pourcentage des cavités vides pour les 2 essences a été évalué à la fin de la germination, soit 45 jours après l'ensemencement.

Pendant le reste de la saison de croissance, les variables de croissance des plants ont été évaluées lors de 9 échantillonnages pour l'épinette noire (2, 15 et 29 juillet, 12 et 26 août, 9 et 23 septembre, 7 et 21 octobre 2013) et de 4 échantillonnages pour l'épinette blanche (2 et 15 juillet, 26 août et 21 octobre 2013), selon les modalités décrites par Lamhamedi *et al.* (2009).

2.3. *Expérience de croissance en germe*

Cette expérience avait pour objectif principal d'évaluer et, si possible, de reproduire en conditions contrôlées (germe) les symptômes caractéristiques observés en pépinière sur les racines des plants (arrêt de la croissance de la racine principale, etc.) qui poussent en présence de silice de mauvaise qualité.

L'apparition des symptômes sur les racines des plants d'épinette blanche (lot de semences : EPB-V1-FAL-1-0) et d'épinette noire (lot de semences : EPN-V2-PLU-1-0) a été évaluée dans un germe (modèle G30, Conviron, Winnipeg, Canada) où la température, l'humidité relative, l'intensité de la lumière et la photopériode étaient contrôlées selon les normes en vigueur de l'ISTA (2009) (21 jours de test, alternance de températures [28 °C jour/20 °C nuit]), photopériode de 16 heures, humidité relative de 85 %).

Le dispositif comptait un total de 16 plats (2 essences x 2 traitements x 4 répétitions) de germination transparents (Spencer Lemaire, Alberta, Canada; voir Wang et Ackerman 1983 pour une description). Chaque plat contient 2,5 litres de substrat de tourbe préalablement humectée avec de l'eau déionisée (teneur en eau : 45 % en volume; Lamhamedi *et al.* 2001). Dans chaque plat, les graines ont été déposées directement sur la tourbe, puis couvertes par de la silice de bonne ou de mauvaise qualité (227,2 g de silice/plat). Le test comprenait 4 répétitions de 100 graines/essence/type de silice réparties aléatoirement dans les plats de germination (la capacité des plats est de 4 échantillons de 100 graines). Les plats étaient placés aléatoirement dans le germe. En aucun cas, les 4 répétitions d'un même traitement/essence ne se sont retrouvées dans le même plat de germination.

À la fin de la phase de germination, nous avons évalué la présence de symptômes associés à la silice de mauvaise qualité, c'est-à-dire l'arrêt de croissance des racines principales des graines germées. Une graine est considérée comme germée lorsque les cotylédons du semis sont visibles (stade 2 décrit par Wang [1973]).

3. Principaux résultats et discussion

3.1. Observations en pépinière

3.1.1. Analyse d'échantillons de plusieurs lots de silice en vrac

Les analyses chimiques en laboratoire (tableau 2) ont permis de distinguer entre la silice de bonne ou de mauvaise qualité sur la base du pH_{eau} , du pH_{CaCl_2} , de la concentration en calcium et de la conductivité électrique, déterminées sur la silice standard qui n'a subi aucun traitement. Une autre variable discriminante est la concentration en calcium déterminée sur de la silice lavée à l'acide chlorhydrique (HCl) et rincée à l'eau déionisée. Ce traitement permet de libérer tout le calcium adsorbé et incrusté dans les interstices des grains de la silice et donc, de déterminer son contenu réel en calcium.

Tableau 2. Variables chimiques (moyenne \pm erreur type) mesurées sur les échantillons de silice de mauvaise et de bonne qualité provenant de différents lots utilisés dans plusieurs pépinières forestières.

Qualité du lot de silice	Pépinière/lot de silice	Nombre d'échantillons composites	pH_{CaCl_2} *	pH_{eau} *	Conductivité électrique ($\mu\text{s}/\text{cm}$)*	Calcium (mg/L) sans traitement *	Calcium (mg/L) après lavage †
Mauvaise	1	10	$7,65 \pm 0,03$	$8,88 \pm 0,05$	$155,50 \pm 8,50$	$29,74 \pm 0,53$	$176,60 \pm 2,10$
	2	3	$7,98 \pm 0,19$	$9,31 \pm 0,22$	$30,10 \pm 0,50$	$5,33 \pm 0,12$	$62,51 \pm 6,51$
	3	3	$8,16 \pm 0,01$	$9,54 \pm 0,02$	$31,17 \pm 0,50$	$5,27 \pm 0,09$	$62,57 \pm 6,88$
	4	3	$6,28 \pm 0,05$	$7,22 \pm 0,09$	non déterminé	$4,20 \pm 0,17$	$21,70 \pm 0,41$
	5	3	$7,77 \pm 0,09$	$9,08 \pm 0,10$	non déterminé	$3,93 \pm 0,26$	$20,23 \pm 2,20$
Bonne	6	3	$4,55 \pm 0,08$	$4,60 \pm 0,04$	non déterminé	$0,70 \pm 0,06$	$2,30 \pm 1,25$
	7	3	$4,78 \pm 0,05$	$5,14 \pm 0,03$	$17,13 \pm 0,82$	$0,03 \pm 0,01$	$0,57 \pm 0,07$

* Concentration en calcium de la silice n'ayant subi aucun traitement.

† Concentration en calcium de la silice après lavage dans 100 ml HCl (0,01 M) et rinçage à l'eau déionisée.

Normalement, à cause de sa composition chimique (SiO_2), la silice ne devrait pas contenir de calcium, sauf si elle est contaminée, recyclée ou traitée par des produits chimiques basiques pour diminuer la libération des poussières dans l'objectif de protéger les travailleurs. Ainsi, même après un lavage au HCl, une silice de bonne qualité a une concentration très faible en calcium (de $0,57 \pm 0,07$ mg/L à $2,30 \pm 1,25$ mg/L) et des pH acides (pH_{eau} de $4,60 \pm 0,04$ à $5,14 \pm 0,03$ et pH_{CaCl_2} de $4,55 \pm 0,08$ à $4,78 \pm 0,05$) (tableau 2). Certains échantillons composites de silice de bonne qualité ont montré des concentrations en calcium allant jusqu'à 5 ppm, mais ne dépassant jamais 6 ppm (Lamhamedi 2015).

Par contraste, les lots de silice de mauvaise qualité que nous avons analysés libèrent de fortes quantités de calcium après un lavage au HCl, ce qui engendre des valeurs très élevées pour le pH_{eau} (de $7,22 \pm 0,09$ à $9,54 \pm 0,02$), le pH_{CaCl_2} (de $6,28 \pm 0,05$ à $8,16 \pm 0,01$), la concentration en calcium après traitement au HCl (de $20,23 \pm 2,20$ à $176,60 \pm 2,10$ mg/L) et la conductivité électrique (de $30,10 \pm 0,50$ à $155,50 \pm 8,50$ $\mu s/cm$) (tableau 2).

La figure 2 présente, à titre d'exemple, les variations du pH_{eau} après différents traitements effectués (tableau 1) sur 3 lots de silice de mauvaise qualité et un lot de bonne qualité. Quel que soit le traitement effectué à la silice (et même après un traitement au HCl), le pH_{eau} de la silice de bonne qualité reste généralement inférieur à 6.

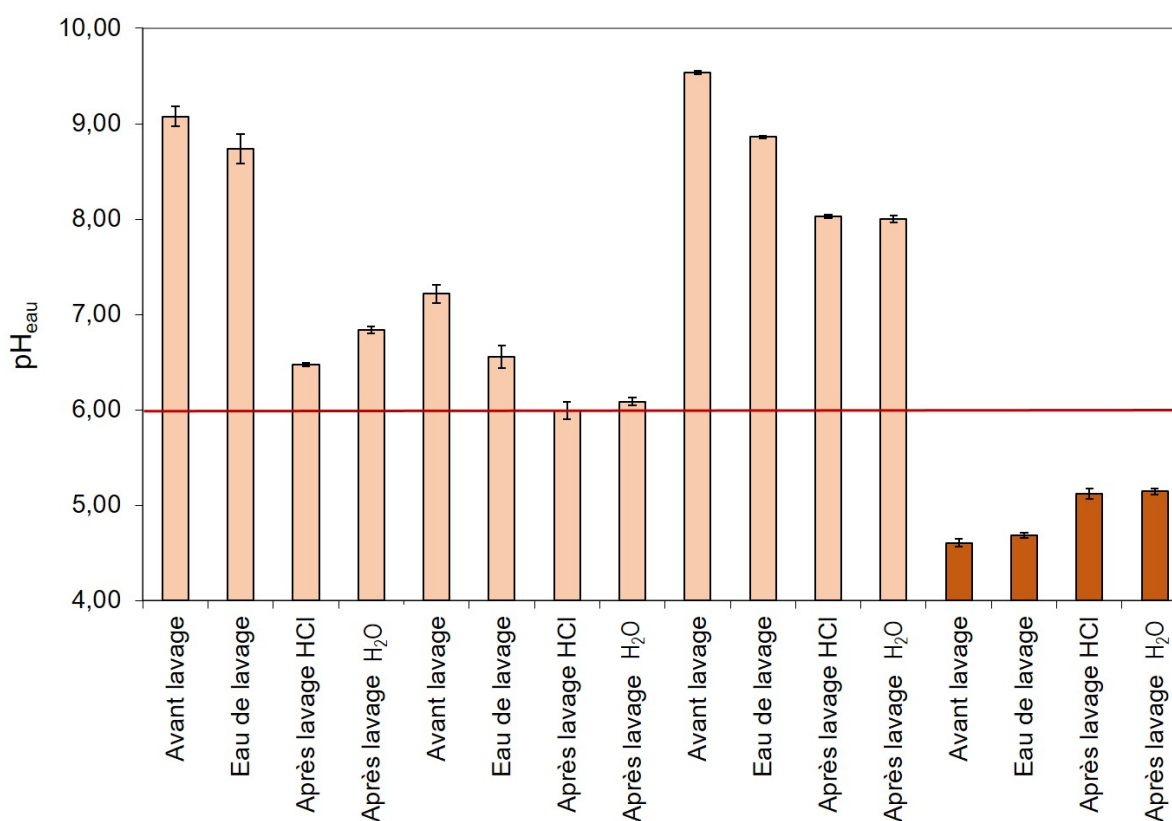


Figure 2. Évolution du pH_{eau} selon les modalités d'analyse de certains échantillons représentatifs de silice de mauvaise qualité (silices 1, 2 et 3, colonnes orange clair) et de bonne qualité (silice 4, colonnes orange foncé). La silice de bonne qualité se distingue par un pH_{eau} inférieur à 6 (ligne rouge horizontale). Chaque colonne représente la moyenne de 3 échantillons composites. Les barres d'erreur correspondent à l'erreur type.

Pour les autres variables analysées, notamment les métaux et métalloïdes (Fe, Cu, Zn, Al, Mg, Mn, B, Mo et S), nous n'avons pas observé de différences majeures entre la silice de bonne et de mauvaise qualité. La majorité des concentrations étaient inférieures à la limite de détection ($< 0,1$ ppm), sauf dans le cas de l'aluminium (de 0,8 ppm à 1,4 ppm) et du soufre (de 1,1 ppm à 1,5 ppm) (Lamhamedi 2015).

La qualité de la silice pourrait aussi être réduite par la présence d'autres composés chimiques toxiques pour les plants forestiers, pour lesquels nous n'avons toutefois pas fait d'analyses spécifiques.

Pour les lots de silice analysés, nous n'avons observé aucun lien entre la couleur (rose, blanc, beige, etc.) et la qualité. Cependant, certains échantillons de silice beige de bonne qualité se distinguaient par un pH très bas et très uniforme. Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'ils proviennent d'un seul endroit où la roche mère est particulièrement homogène.

Malgré tout, nous croyons que le matériau de recouvrement utilisé pour la culture en récipients devrait être de préférence de couleur blanchâtre. Cela favoriserait la réflexion des rayons lumineux et diminuerait la température dans l'environnement immédiat de la graine. En effet, lors de la germination des plants d'épinette blanche en pépinière, la température maximale à l'interface graine-silice dépasse souvent les 30 °C (Lamhamedi 2013). Or, on sait qu'au-delà de ce seuil, la germination des semences est limitée pour les principales essences commerciales de la forêt boréale, notamment l'épinette blanche, le pin gris et l'épinette noire (Qualtiere 2008).

3.1.2. Analyse d'échantillons obtenus d'un fournisseur avant l'achat d'un lot de silice

Tous les 6 échantillons composites du lot de silice testés se distinguent par un pH extrêmement élevé et une concentration en calcium anormalement élevée, plus particulièrement après le lavage à l'acide (HCl 0,01 M) (tableau 3). Avant ce traitement, la concentration en calcium de ce lot de silice ($29,60 \pm 0,83$ ppm) était même plus forte que celle de la calcite granulaire non traitée à l'acide ($7,40 \pm 0,50$ ppm, $n = 3$ échantillons composites; Lamhamedi 2015).

Tableau 3. Principales variables chimiques (moyenne \pm erreur type) mesurées sur les 6 échantillons composites d'un lot de silice obtenus d'un fournisseur avant l'achat.

Variable	Moyenne \pm erreur type (n = 6 échantillons composites)
pH _{eau}	8,88 \pm 0,06
pH _{CaCl2}	7,65 \pm 0,05
Calcium (mg/L) sans traitement *	29,60 \pm 0,83 ppm
Calcium (mg/L) après lavage †	177,17 \pm 3,18 ppm
Conductivité électrique (μ s/cm)*	157,83 \pm 10,63
Concentration en Soufre	5,36 \pm 0,60

* Concentration en calcium de la silice n'ayant subi aucun traitement.

† Concentration en calcium de la silice après lavage dans 100 ml HCl (0,01 M) et rinçage à l'eau déionisée.

La majorité (86 %) des grains de silice ont un diamètre de plus de 2 mm. Les grains de taille moyenne (1 mm < diamètre \leq 2mm) représentent 13 % du lot, tandis que le reste est constitué de grains fins (0,2 %; 0,425 mm < diamètre \leq 1 mm) ou très fins (0,6 %; diamètre \leq 0,425 mm) mélangés avec de la poussière.

Un exemple de certificat des résultats d'analyse chimique et granulométrique des échantillons de silice, dûment approuvés par un chimiste, est présenté en annexe. Les pépinières qui veulent recourir aux services d'autres laboratoires d'analyse pour déterminer la qualité de leur silice pourront utiliser ce certificat à titre d'exemple, pour préciser clairement les traitements à faire avant l'analyse de la silice ainsi que la manière de présenter les résultats des analyses chimiques (concentrations, limite de détection de chaque paramètre, etc.).

Selon le professeur Richard Bélanger (Université Laval, comm. pers. privée) les modifications importantes de certaines propriétés physicochimiques de la silice peuvent avoir des effets négatifs sur la croissance des racines et des parties aériennes. Elles pourraient être associées à une silice recyclée qui aurait été nettoyée par des produits basiques ou encore, à une silice traitée chimiquement pour diminuer la poussière dans la chaîne de production. En effet, la silice est largement utilisée dans plusieurs industries, notamment du domaine agroalimentaire (épuration et assainissement des eaux usées) et du domaine biomédical (fabrication de composantes électroniques).

Les résultats de l'analyse chimique réalisée sur le lot de silice avant son achat (libération de plusieurs ions, pH extrêmement élevé, etc.; tableau 3) nous font croire qu'il s'agit d'une silice de mauvaise qualité. À la lumière de ces résultats, le pépiniériste n'a pas acheté le lot de silice en question.

De ce qui précède, il ressort aussi que le pH (pH_{eau} ou $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$) et la concentration en calcium après lavage de la silice au HCl) sont deux variables sur lesquelles le pépiniériste peut se baser pour vérifier la qualité de tous les lots (sacs) de silice avant leur achat.

3.1.3. Observations générales de la croissance des plants en pépinière

Dans les pépinières forestières privées et publiques touchées par ce problème, l'utilisation d'une silice de mauvaise qualité engendre une variabilité et un retard marqué de la croissance dans un même secteur ou dans plusieurs récipients contigus (tunnel, serre, etc.) chez plusieurs essences résineuses (figure 3). Les différences observées dans des zones ciblées constituées de plusieurs récipients dans un même tunnel, tant pour la croissance des racines que celle en hauteur des plants (figures 3, 4 et 5), ne peuvent être attribuées qu'à la variabilité de la qualité de silice puisque le lot de semences, la date d'ensemencement, le substrat de croissance (composition, densité, etc.) et les régies d'irrigation et de fertilisation (appliquées à l'aide d'un robot d'arrosage avec un coefficient d'efficacité de plus de 98 %) sont tous les mêmes. Dans certaines pépinières, nous avons observé les effets négatifs de la silice de mauvaise qualité sur la croissance des racines et des parties aériennes à l'échelle de plusieurs tunnels et de plusieurs lots dont les pertes sont estimées à des millions de plants (Lamhamedi 2022). Ceci indique qu'une grande partie du lot de silice reçue par la pépinière est de mauvaise qualité.



Figure 3. Exemples montrant la variabilité observée pendant la première saison de croissance (1+0) dans un même tunnel, pour des plants a) d'épinette rouge, b) d'épinette noire, et c) d'épinette blanche. Les photos proviennent de pépinières forestières différentes.

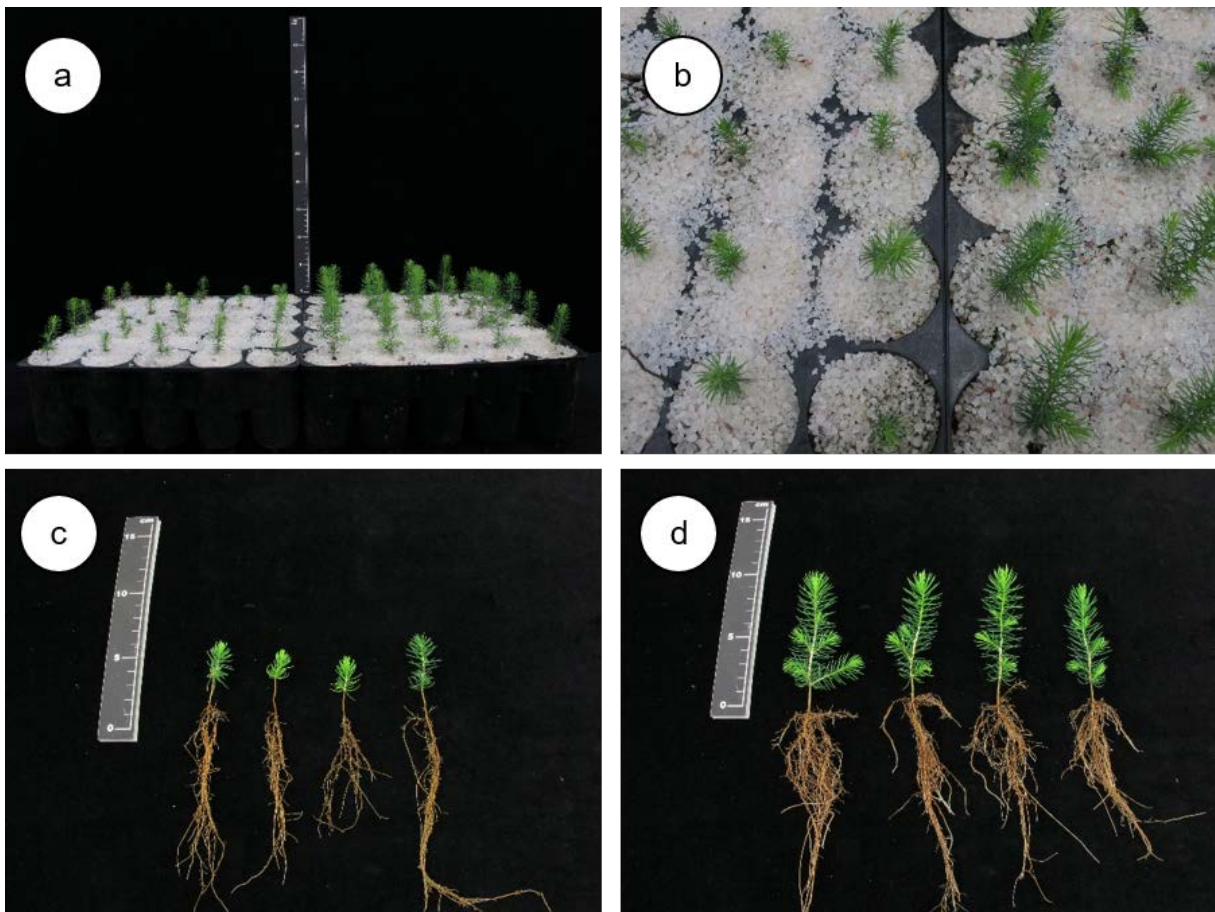


Figure 4. Variabilité de la croissance de plants 1+0 d'épinette rouge lorsque les grainesensemencées sont recouvertes de silice dont la qualité est mauvaise (à gauche) ou bonne (à droite) : a) vue latérale des plants dans leurs récipients; b) récipients et plants vus du dessus; c et d) vue des plants complets avec les racines lavées.

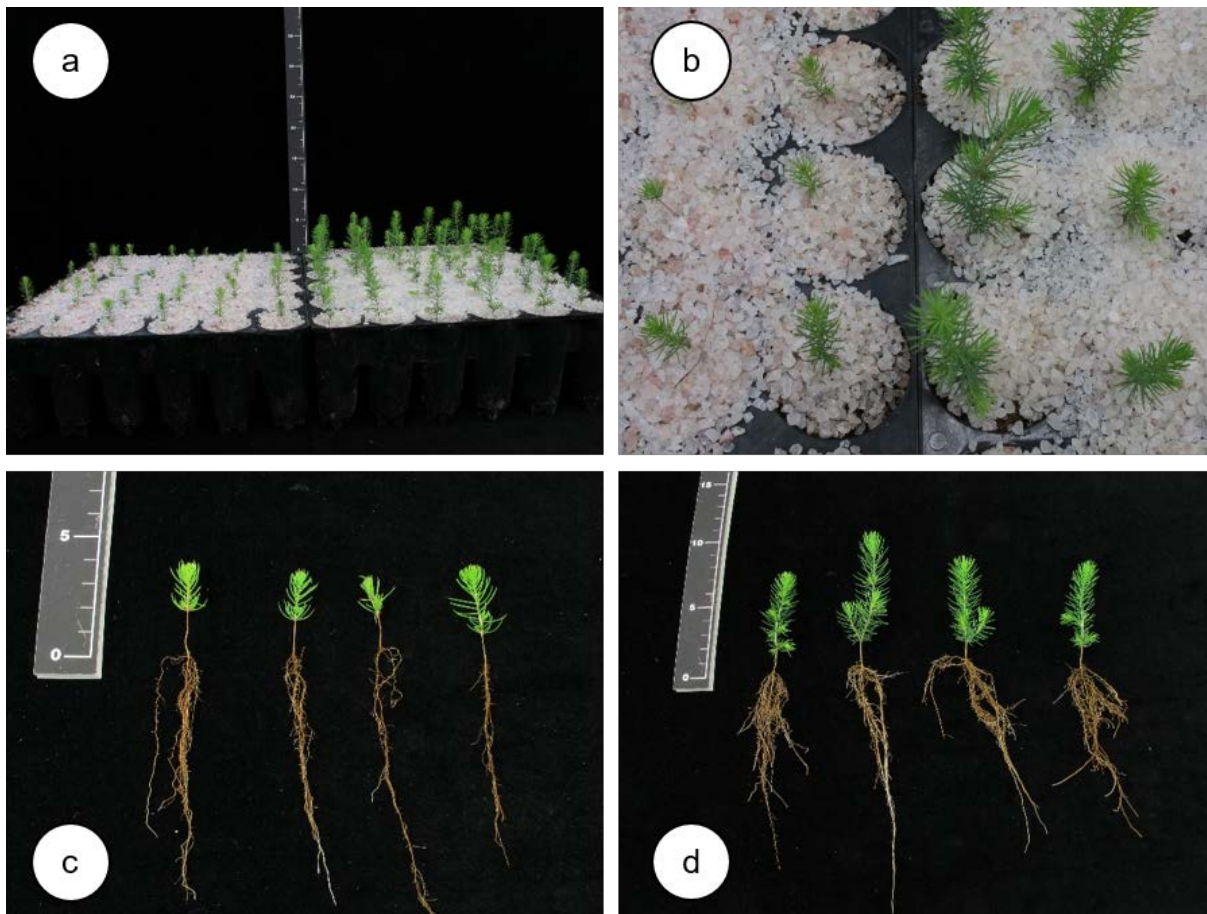


Figure 5. Variabilité de la croissance de plants 1+0 d'épinette noire lorsque les graines ensemencées sont recouvertes de silice dont la qualité est mauvaise (à gauche) ou bonne (à droite) : a) vue latérale des plants dans leurs récipients; b) récipients et plants vus du dessus; c et d) vue des plants complets avec les racines lavées.

Lorsque la silice utilisée est constituée d'un mélange de lots de qualité variable, le pépiniériste pourrait mettre en doute l'homogénéité de la qualité de cette silice, une fois qu'il aura éliminé les autres causes possibles (problèmes de substrat, d'irrigation, causes biotiques, etc.) de la mauvaise performance des plants (retard de croissance, non-atteinte des normes, etc.).

Chez l'épinette blanche en particulier, la silice de mauvaise qualité nuit autant à la croissance en hauteur qu'à celle des racines des jeunes semis : il arrive souvent que la racine principale meurt, que les racines latérales se développent anormalement et que des racines adventives soient initiées directement sur la tige du plant, comme le font des boutures (figure 6). La présence de racines adventives a été observée plus souvent chez les plants d'épinette blanche que chez ceux d'épinette noire et d'épinette rouge. Chez *Pinus taeda* L, l'absence de racines principales et le développement de racines adventives ont été observés sur des plants produits à racines nues en pépinière forestière, après une surdose accidentelle de sulfate d'ammonium; cette substance a acidifié le sol jusqu'à un pH de 3,3 et a augmenté la concentration du sol

en soufre (94 ppm) (South 2017). Dans le cadre de nos travaux, nous n'avons pas observé des concentrations élevées en soufre dans le substrat ou dans la silice de mauvaise qualité, puisque celles-ci ne dépassaient guère 7 ppm (tableau 3).

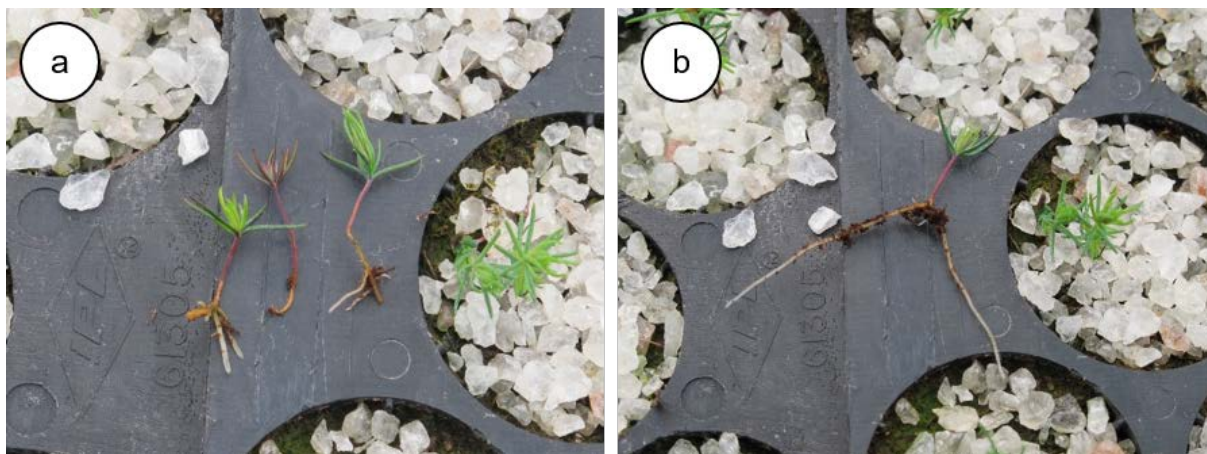


Figure 6. Croissance des racines de semis 1+0 d'épinette blanche dans des récipients recouverts de silice de mauvaise qualité. Notez l'absence de la racine principale et des racines latérales et l'initiation des racines adventives directement de la tige, comme s'il s'agissait de boutures.

Nos travaux sur le suivi continu des températures à l'interface silice-tourbe pendant les phases de germination et de croissance des plants 1+0 ont montré qu'à elles seules, des températures élevées (de 30 °C à 40 °C) n'ont favorisé en aucun cas l'atrophie racinaire, l'arrêt de croissance de l'apex des racines principales et le développement de racines adventives (Lamhamedi 2013, 2022). Dans les tunnels où nous avons observé une variabilité de la croissance (figure 3), les plants, par exemple d'épinette blanche (1+0) ayant une croissance normale n'ont pas montré d'atrophie de la racinaire principale. En revanche, chez les plants chétifs, les racines principales étaient inexistantes, et des racines adventives étaient présentes (figure 6). De ce qui précède, on peut déduire que l'arrêt ou la mortalité des racines principales, de même que l'initiation des racines adventives (figure 6), sont caractéristiques de l'utilisation de la silice de mauvaise qualité comme matériau de recouvrement.

La silice de mauvaise qualité favorise aussi l'apparition de symptômes de carence en phosphore, notamment la coloration pourpre caractéristique des aiguilles (figure 7) (Lamhamedi et Gingras 2009, Lamhamedi *et al.* 2013, Landis *et al.* 1989). Cette carence survient généralement lorsqu'un pH très élevé rend le phosphore non disponible pour le plant. En effet, à un pH supérieur à 7, les ions de calcium et de magnésium entraînent la précipitation du phosphore, ce qui en diminue la disponibilité (Tisdale *et al.* 1985). L'augmentation du pH dans la rhizosphère découle d'une libération rapide du calcium contenu en fortes concentrations dans la silice de mauvaise qualité, et probablement aussi de la présence d'autres composés basiques non détectés dans nos analyses.



Figure 7. Effets de la silice de mauvaise qualité sur la nutrition minérale des plants 1+0 d'épinette blanche : a) coloration pourpre des aiguilles due à une carence en phosphore causée par la non-disponibilité de cet élément à cause du pH très élevé de la silice (pH_{eau} de $8,00 \pm 0,04$ à $9,54 \pm 0,02$); b) coloration normale des aiguilles chez des plants cultivés dans de la silice de bonne qualité (pH_{eau} de $4,60 \pm 0,04$ à $5,14 \pm 0,03$).

Les pépiniéristes forestiers aux prises avec des lots et des secteurs touchés par cette problématique nous ont confirmé qu'ils n'ont pas pu livrer des plants respectant les normes de qualification en vigueur au Québec (figure 8). À titre d'exemple, certains lots de plants de fortes dimensions d'épinette blanche (2+0) avaient une hauteur moyenne de seulement 10 à 15 cm, alors que la cible est de 35 cm (figure 8).

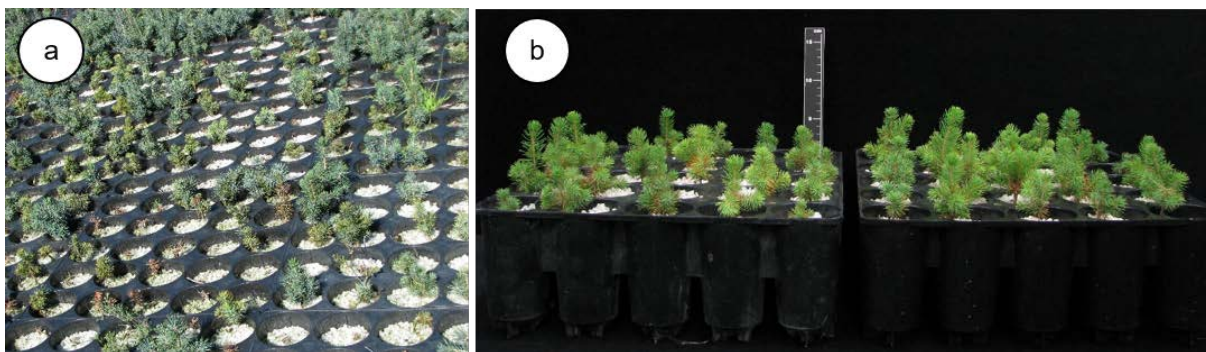


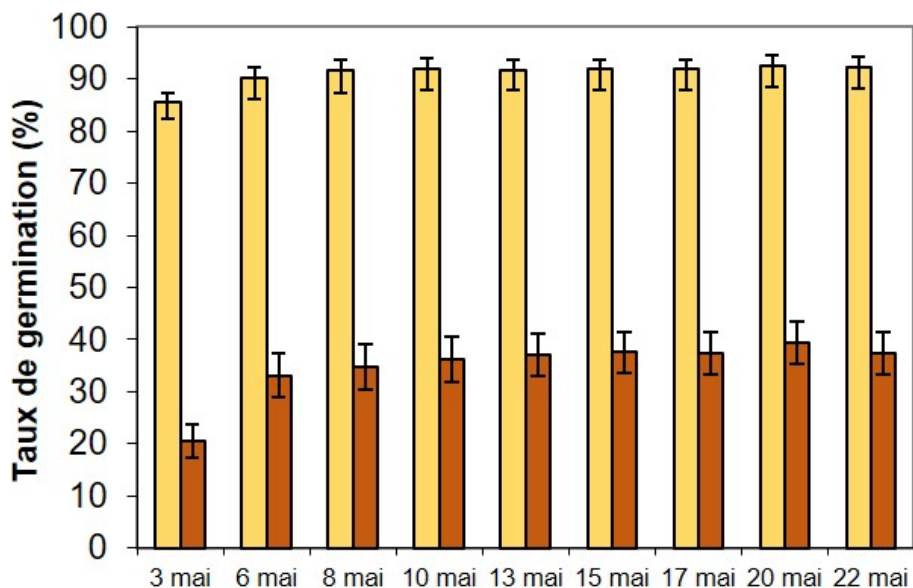
Figure 8. Effets de la mauvaise qualité de silice sur la croissance des plants d'épinette blanche à la fin de leur 2^e saison de croissance (2+0) dans 2 pépinières forestières différentes. Notez l'abondance des cavités vides a) à cause de la mauvaise germination des semences en présence de la mauvaise qualité de silice, b) le retard de croissance et la non-atteinte des normes de qualification des plants. Tous les plants de ces 2 lots ont été rejetés (a et b).

3.2. Dispositif expérimental en pépinière

Par rapport aux plants cultivés dans des récipients recouverts de calcite, ceux en présence de silice de mauvaise qualité ont eu un taux de germination des semences nettement plus faible (en moyenne, 37,4 % contre 92,3 %, respectivement, pour l'épinette blanche, et 44,3 % contre 93,8 % pour l'épinette noire; figure 9). L'évolution des taux de germination chez les 2 essences montre que l'effet négatif de la silice de mauvaise qualité sur la germination des semences est relativement immédiat, et qu'il se maintient tout au long et au-delà de la phase de germination des semences d'épinette noire et d'épinette blanche

(figure 9). De même, les récipients recouverts de silice de mauvaise qualité contenaient beaucoup plus de cavités vides (en moyenne, 54,2 % contre 6,3 % pour l'épinette blanche, et 46,8 % contre 4,3 % pour l'épinette noire; figure 10). La mauvaise germination des semences, tout comme le développement anormal du système racinaire décrit à la section 3.1.3, résultent probablement de la baisse rapide du potentiel osmotique (Thomas et Wein 1985) généré par les ions libérés par la silice de mauvaise qualité.

a) Épinette blanche



b) Épinette noire

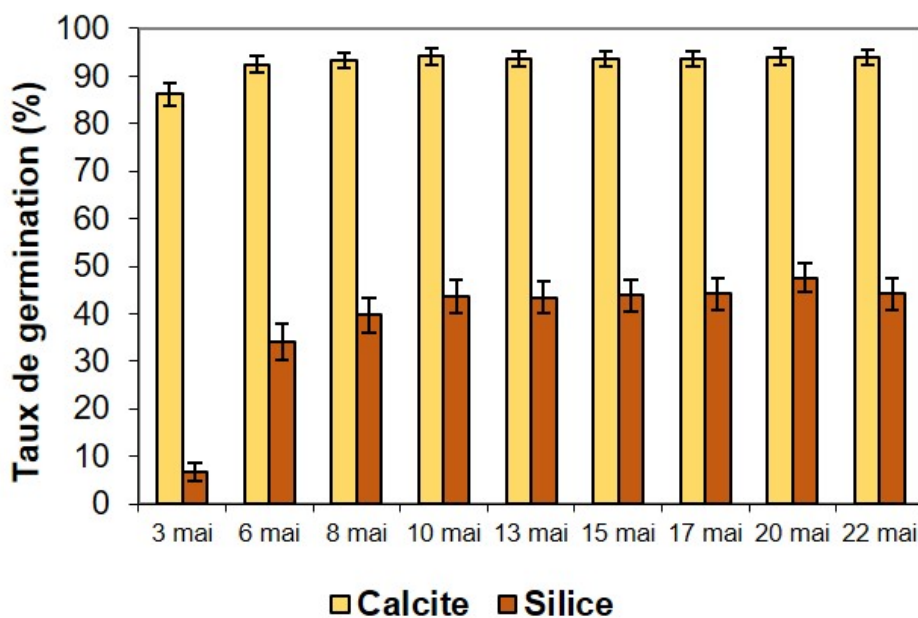


Figure 9. Évolution du taux moyen de germination des semences a) d'épinette blanche, et b) d'épinette noire cultivées en serre dans des récipients 45-110 contenant un substrat tourbeux (100 %) recouvert de calcite ou de silice de mauvaise qualité (n = 900 cavités par traitement. Épinette blanche : 1,32 semences/cavité; épinette noire : 1,26 semences/cavité).

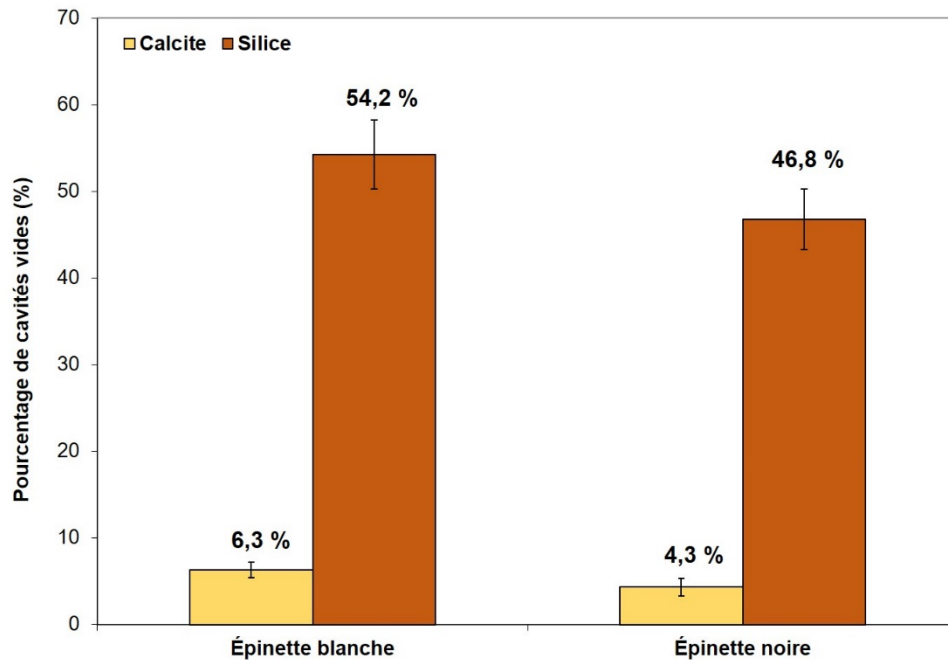


Figure 10. Pourcentage (%) de cavités vides chez des plants d'épinette blanche et d'épinette noire cultivés en serre dans des récipients (45-110) contenant un substrat tourbeux (100 %) recouvert de calcite ou de silice de mauvaise qualité (n = 900 cavités par traitement. Épinette blanche : 1,32 semences/cavité; épinette noire : 1,26 semences/cavité). L'évaluation a été effectuée lorsque la germination a été complètement terminée, soit 45 jours après l'ensemencement.

À la fin de leur première saison de croissance, les plants 1+0 d'épinette blanche et d'épinette noire cultivés avec de la silice de mauvaise qualité montraient des retards significatifs de croissance tant dans les parties aériennes que dans les racines (figures 11 à 13). De fait, toutes les variables de croissance observées dans ce dispositif pendant la première année de croissance (figure 13) sont inférieures à celles observées dans nos travaux antérieurs (Lamhamedi *et al.* 2001, 2009). De tels plants ne seront pas en mesure d'atteindre, un an plus tard, les critères et normes de qualité lors de leur livraison pour le reboisement (stade 2+0).

Les valeurs de conductivité électrique mesurées dans les échantillons de silice de mauvaise qualité sont relativement élevées (106-168 $\mu\text{S}/\text{cm}$), mais demeurent très faibles par rapport aux valeurs de salinité considérées comme critiques (> 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et réduisant significativement la croissance des semis d'épinette noire (Timmer et Parton 1982). Donc, dans le cas de la silice de mauvaise qualité, la mauvaise croissance des racines et des parties aériennes des plants d'épinette noire et blanche (figures 11 à 13) ne peut s'expliquer par une conductivité électrique trop élevée engendrée par les différents cations (tableau 3).

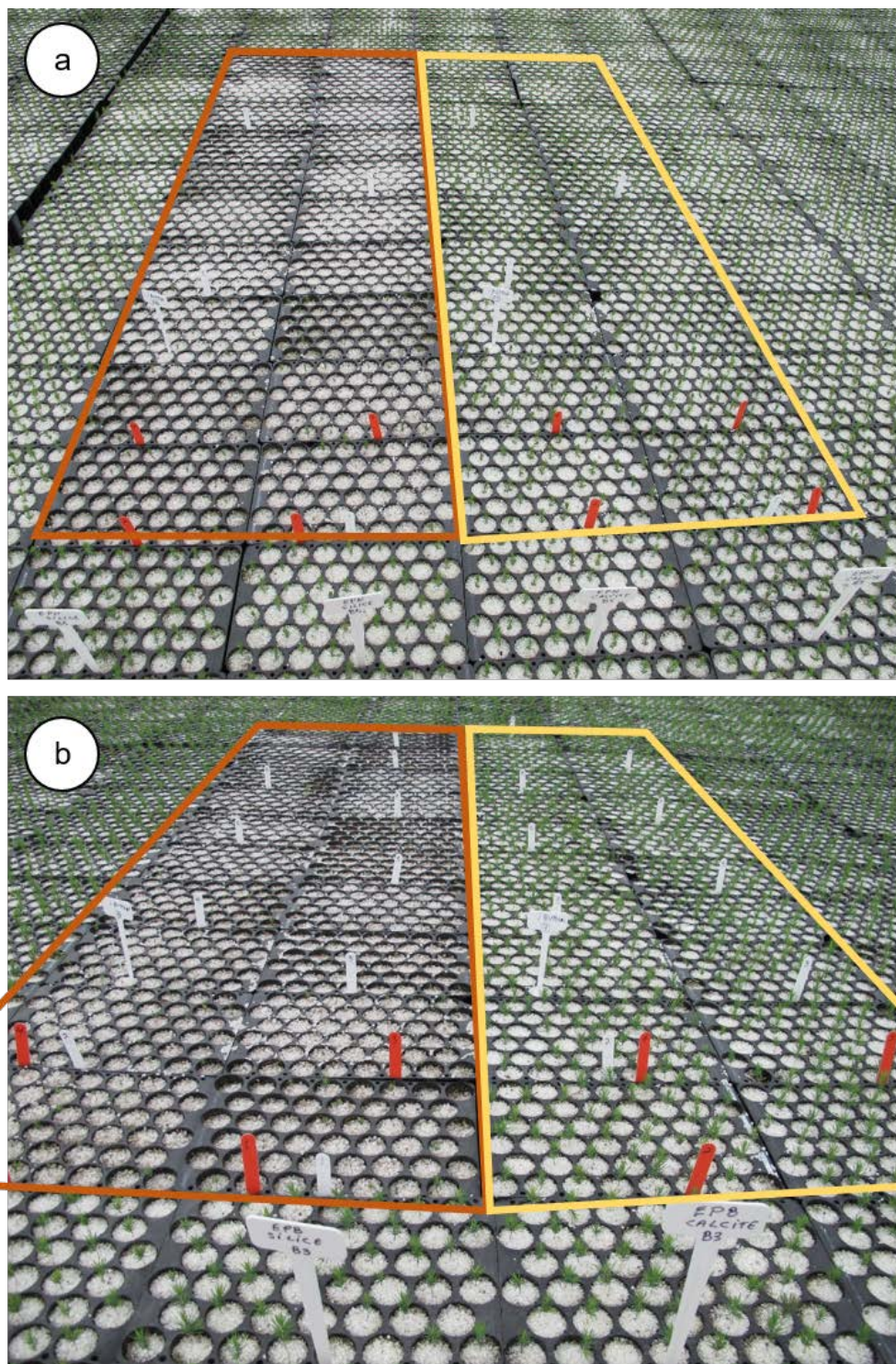


Figure 11. Retard de croissance des plants cultivés avec de la silice de mauvaise qualité (encadrés orange foncé, à gauche) par rapport à ceux cultivés avec de la calcite (encadrés jaune orangé, à droite) dans un bloc du dispositif; a) épinette noire, b) épinette blanche (17 juin 2013).

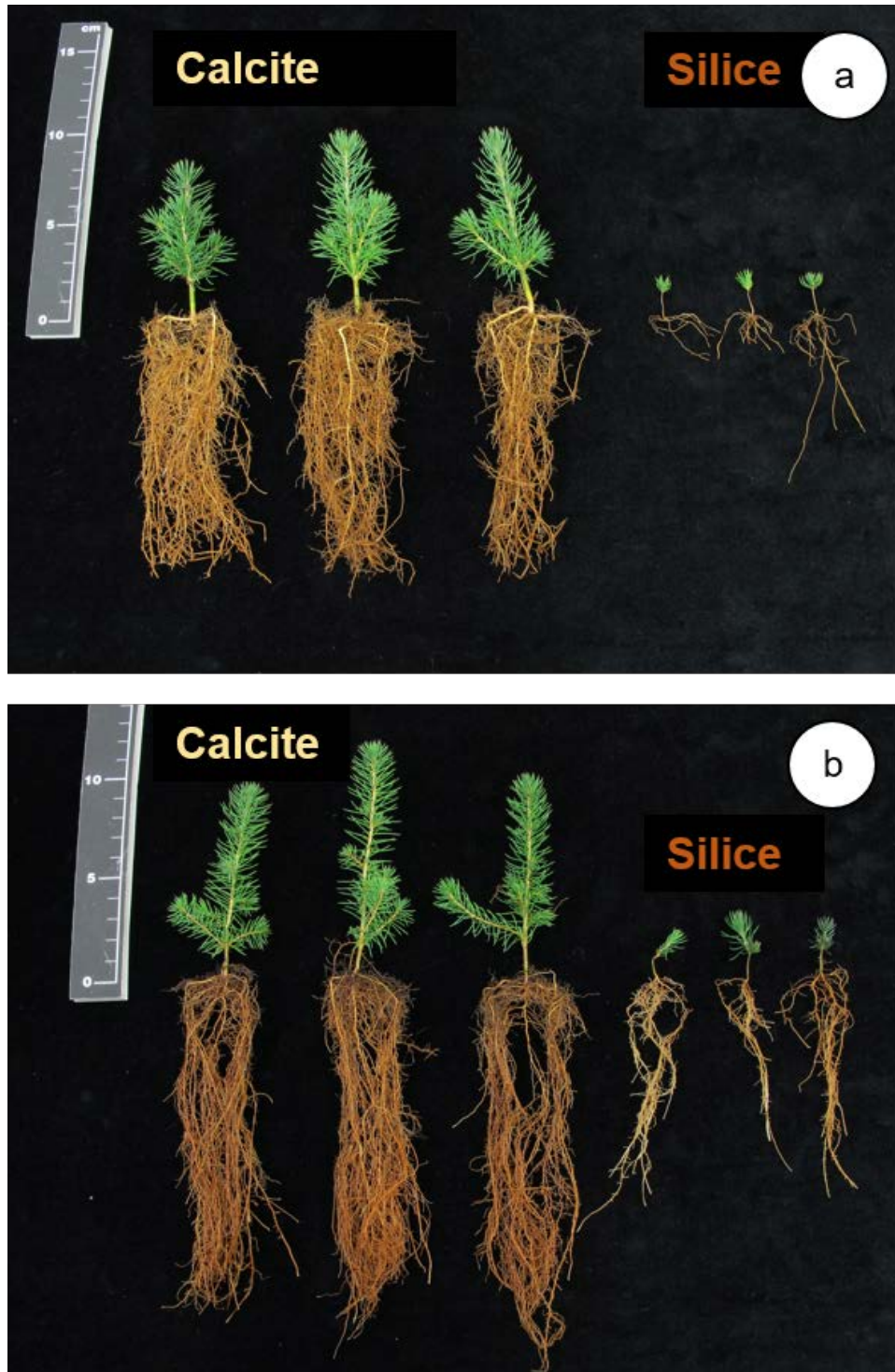


Figure 12. Comparaison de la croissance des parties aériennes et des racines vers la fin de la saison de croissance des plants (1+0) a) d'épinette blanche et b) d'épinette noire en serre, produits en récipient (45-110) dans un substrat tourbeux (100 %) recouvert de calcite (à gauche) ou de silice de mauvaise qualité (à droite) (21 octobre 2013).

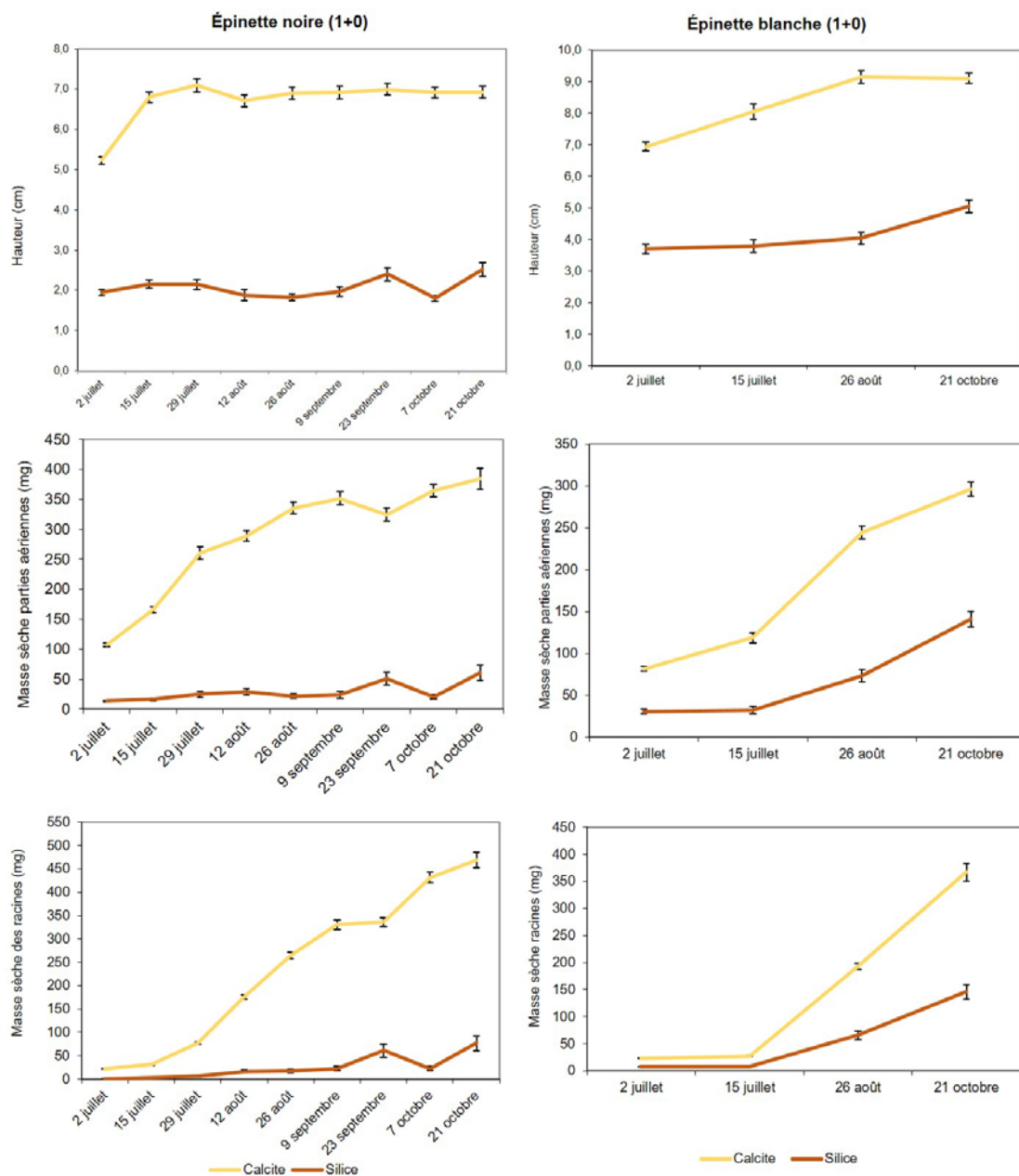


Figure 13. Évolution de la croissance en hauteur ($n = 75$), des masses sèches des parties aériennes et des racines des plants 1+0 d'épinette noire (à gauche) et d'épinette blanche (à droite) selon le matériau de recouvrement (silice de mauvaise qualité ou calcite).

3.3. Expérience de croissance en germe

Dans l'expérience en germe, les taux de germination des semences en présence de silice de bonne qualité ont atteint 95 % pour l'épinette blanche et 92 % pour l'épinette noire, alors qu'en présence de silice de mauvaise qualité, ils étaient de 87,3 % et de 87,5 %, respectivement. Ces valeurs élevées en présence de silice de mauvaise qualité contrastent avec ce qui a été observé en pépinière. La différence pourrait s'expliquer par l'absence d'irrigation pendant le séjour en germe alors qu'en pépinière, les irrigations fréquentes pendant la phase de germination favorisent la libération importante et immédiate des différents

composés chimiques contenus dans la silice. Ceci concorde avec les résultats obtenus lors des différents traitements des échantillons de silice et les modifications physicochimiques (tableaux 2 et 3).

Lors de la germination, les jeunes semis ont produit des racines blanches normales en présence de silice de bonne qualité (figure 14a). Par contre, en présence de silice de mauvaise qualité, ils ont montré une croissance racinaire déficiente, dont les symptômes se sont manifestés d'abord par un brunissement des racines (figure 14b), puis par la mort et l'arrêt de croissance de la racine principale (figure 14c).



Figure 14. Comparaison de la croissance et de l'architecture des racines de jeunes semis d'épinette noire après 30 jours de culture en germe en présence de silice de bonne (a) ou de mauvaise qualité (b-c). Malgré un bon pourcentage de germination dans les 2 traitements, la silice de mauvaise qualité a un effet négatif sur la croissance des racines : leur brunissement (b) est suivi par l'arrêt de croissance de la racine principale (c).

Ces symptômes, semblables à ceux observés en pépinière (figure 6) et dans notre dispositif expérimental (figure 11), démontrent clairement que la silice de mauvaise qualité inhibe la croissance de la racine principale des jeunes semis d'épinettes. Ceci retarde les phases subséquentes de croissance et de développement des parties aériennes et racinaires des plants. L'absence d'une racine principale peut expliquer la mortalité des plants et le nombre de cavités vides observés dans les pépinières forestières (figure 8) et dans notre dispositif installé à la pépinière de Girardville (figures 9, 10 et 11). En pépinière, les plants qui ont initié des racines adventives après la mort de la racine principale ont pu survivre, mais leur croissance était faible, tant pour les racines que pour les parties aériennes (figures 6, 11 à 13). Ce retard s'explique en grande partie par le fait que pendant la phase de mortalité des racines principales et d'initiation des racines adventives, les racines ont une faible capacité d'absorption de l'eau et des éléments minéraux. En effet, à l'inverse de plants dotés d'un système racinaire normal, les plants qui n'ont pas de racines ou quelques racines adventives (figures 4-6, 11-12) ne peuvent pas explorer rapidement un grand volume de substrat pour épuiser les éléments minéraux et l'eau dans la rhizosphère tout au long de la profondeur de chaque cavité du récipient.

L'humidité relative très élevée dans le germeoir (80 %) permet aux semis de survivre même après la mort de leur racine principale (figure 14 b-c), à l'image de ce qui se passe dans des enceintes de bouturage, et à l'inverse des conditions habituelles en pépinière (humidité relative plus faible, température plus forte, déficit de pression de vapeur plus grand, etc.). Ainsi, en conditions de germeoir, c'est la morphologie de la racine principale et non le taux de germination des semis obtenu après 21 jours qui permet de discriminer entre la silice de bonne ou de mauvaise qualité.

4. Conclusion

Nos nombreuses visites réalisées dans plusieurs pépinières forestières publiques et privées et l'installation de dispositifs rigoureux en pépinière et au laboratoire ont permis de faire un diagnostic au sujet de la problématique entourant la silice de mauvaise qualité et de déterminer certains indicateurs à la portée du pépiniériste (tableau 4).

Tableau 4. Synthèse des principales différences mesurées lors de l'analyse chimique de lots de silice de bonne ou de mauvaise qualité.

Variable chimique	Silice de bonne qualité	Silice de mauvaise qualité	Remarques
pH _{eau}	4,6 à 5,5	> 7	Figure 2, tableaux 2 et 3
pH _{CaCl2}	< 5	> 7	Tableaux 2 et 3
Calcium (ppm)	≤ 6 ppm	20 – 190 ppm	Le dosage du Ca devra être effectué après traitement des échantillons à l'acide (HCl : 0,01 M) (Tableaux 2 et 3)

À la suite de tous ces travaux, nous pouvons conclure que :

- Une silice de mauvaise qualité se caractérise par un $\text{pH}_{\text{eau}} > 7$, une concentration en calcium très élevée après traitement au HCl (de 20 à 190 mg/L, tableau 4) et possiblement par la présence d'autres composés non déterminés dans le cadre de nos analyses;
- Bien que la silice de couleur beige se distingue par un pH_{eau} acide (4,6) et une faible concentration en calcium (de 1 à 4,8 ppm), la couleur en elle-même ne peut servir d'indicateur fiable de la qualité d'un lot. Des silices de même couleur, par exemple blanche ou rosée, peuvent avoir des qualités différentes;
- Un même fournisseur peut livrer aux pépiniéristes des lots de silice de qualités différentes (même livraison de la même année);

Ces indicateurs pourront aider le pépiniériste à reconnaître la silice de mauvaise qualité et à prendre une décision d'achat qui tient compte de la qualité des lots de ce matériau.

Les effets de la silice sur la germination, la croissance et la nutrition minérale varient selon le contenu et la composition physicochimique de celle-ci (pH, Ca, autres composés non déterminés dans le cadre de nos analyses) :

- La silice de mauvaise qualité (pH, Ca et autres) a un effet négatif sur le taux de germination, le nombre de cavités pleines, la croissance des racines (absence de racine principale et développement de racines adventives, à l'image d'une bouture) et des parties aériennes (retard et croissance en hauteur hétérogène dans des zones [groupes de récipients] délimitées dans un même tunnel ou faible croissance à l'échelle du tunnel) (tableau 5);
- Dans certains cas, la silice de mauvaise qualité compromet aussi la nutrition minérale des plants produits en pépinière (coloration pourpre au début de la phase d'élongation : carence en phosphore due au pH élevé et à l'excès de calcium) (tableau 5).

À cause de sa composition chimique, certains pépiniéristes utilisent la calcite granulaire (CaCO_3) comme matériau de recouvrement pour améliorer la physicochimie du substrat (pH, calcium, CO_2 , etc.), la croissance, la physiologie, la germination des spores et la colonisation des racines par des champignons ectomycorhiziens, la cohésion des racines et le taux de conformité des plants selon les normes et critères de qualification (Lamhamedi *et al.* 2020a, 2020b, 2021). L'utilisation de ce matériau de recouvrement plutôt que de la silice pourrait être une piste de solution au problème de la silice de mauvaise qualité. Les propriétés physicochimiques de la silice de bonne qualité et de la calcite granulaire, de même que leurs effets sur la croissance et la physiologie des plants d'épinette blanche (1+0 et 2+0), sont décrits en détail par Lamhamedi *et al.* (2020a, 2020b, 2021). Cependant, la granulométrie de la calcite granulaire doit être grossière pour éviter la formation d'une croûte et le développement de mousses et d'algues.

Tableau 5. Synthèse des principaux effets de la silice de mauvaise qualité sur la germination, la croissance et la nutrition minérale des plants en pépinière forestière.

Variable	Silice de bonne qualité	Silice de mauvaise qualité	Exemples
Taux de germination	<ul style="list-style-type: none"> Bon 	<ul style="list-style-type: none"> Faible 	Figure 9
Taux d'occupation	<ul style="list-style-type: none"> Bon 	<ul style="list-style-type: none"> Faible 	Figure 10, 11
Homogénéité et uniformité de croissance du lot	<ul style="list-style-type: none"> Uniforme Normale 	<ul style="list-style-type: none"> Très hétérogène 	Figures 3, 4, 5, 8, 11, 12
Racines	<ul style="list-style-type: none"> Bonne croissance Présence de racines principales et latérales 	<ul style="list-style-type: none"> Croissance très réduite Absence de racine principale Développement de racines adventives 	Figures 4, 5, 6, 14
Parties aériennes	<ul style="list-style-type: none"> Bonne croissance 	<ul style="list-style-type: none"> Croissance très réduite 	Figures 3, 4, 5, 12
Standards de croissance	<ul style="list-style-type: none"> Les courbes de croissance respectent les standards 	<ul style="list-style-type: none"> Les courbes de croissance sont loin des standards 	Figures 13
Symptômes de carence	<ul style="list-style-type: none"> Aucun symptôme de carence 	<ul style="list-style-type: none"> Carence en phosphore dans certains lots 	Figure 7

Considérant la rareté de la silice au Québec, les pépinières forestières qui commencent à s'orienter vers d'autres matériaux de recouvrement des récipients (matériel biologique vert, gravier, granite, calcite, sable grossier de rivière, etc.) devraient porter une attention particulière à certaines caractéristiques : la matière choisie doit être chimiquement inerte, de texture grossière (afin d'éviter l'abondance de particules fines et ne pas affecter la germination et la levée des semis, tout en assurant une bonne aération du substrat), de couleur blanche (pour maximiser la réflexion de la lumière et diminuer la température dans l'environnement physique de la graine) et ne pas attirer les oiseaux. Des essais rigoureux et répétés doivent être réalisés avant de changer définitivement le matériau de recouvrement.

5. Recommandations : éléments et paramètres à préciser dans les appels d'offres pour l'achat de silice

- Le fournisseur devrait fournir une attestation qui certifie que tous les lots de silice livrés sont exempts de silice recyclée.
- Les différents lots de silice livrés ne devraient pas être imprégnés ou traités par des produits (détergents basiques ou produits anti-poussièreux basiques) qui nuisent à la germination, à la croissance des racines, des parties aériennes ou à la nutrition minérale des plants produits en pépinière forestière.

- Pour chaque lot et chaque sac de silice, le pH_{eau} ne doit pas être supérieur à 6, et la concentration en calcium (Ca) ne doit pas être supérieure à 6 ppm.
- Pour les analyses du pH et du Ca, le fournisseur de silice devrait fournir au moins un échantillon composite par sac homogène de silice livré (provenance, année et lieu de production, morphologie des grains de silice, etc.). Chaque échantillon composite devra être constitué de 3 sous-échantillons prélevés respectivement dans le haut, le milieu et la base du sac. Par la suite, pour des analyses détaillées (annexe), le pépiniériste pourrait procéder à des regroupements des échantillons composites selon l'homogénéité des lots.
- Idéalement, ces analyses doivent être effectuées par le laboratoire de chimie organique et inorganique du MFFP ou par un laboratoire accrédité par le Conseil canadien des normes (ISO/CEI 17025), plus spécifiquement pour les analyses de pH et du calcium;
- Le fournisseur de silice doit fournir *i)* un certificat des résultats d'analyses délivré par un laboratoire accrédité et dûment approuvé par un chimiste (voir l'annexe pour un exemple), et *ii)* un duplicata des échantillons soumis au laboratoire lors des analyses;

6. Remerciements

Nous tenons sincèrement à remercier le personnel des pépinières publiques et privées de l'Office de production de plants forestiers du Québec. Nous remercions également tout le personnel du laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRF pour les analyses minérales des échantillons et les discussions enrichissantes avec les responsables du laboratoire (MM. Carol DeBlois et Denis Langlois).

Nous remercions M. Rock Ouimet (ing.f., Ph. D.), chercheur émérite à la DRF, M. Denis Langlois, chimiste et responsable du laboratoire de chimie organique et inorganique et M. Jean-Pierre Saucier, pour leurs suggestions lors de la révision de cet avis technique.

Nos remerciements s'adressent également à M^{me} Denise Tousignant et à M. Alexandre Dallaire-Théroux de la DRF pour la révision et l'édition de ce document, ainsi qu'à M^{me} Nathalie Langlois pour la mise en page.

Cet avis technique a été réalisé dans le cadre du projet de recherche de la DRF n° 3321-142332093 intitulé *Optimisation des principales pratiques culturales affectant l'insuffisance racinaire et la qualité morphophysiological des plants produits en pépinière forestière* (titulaire : Mohammed S. Lamhamedi, ing.f., M. Sc., Ph. D.). Certains résultats ont déjà fait l'objet d'activités de transfert de connaissances auprès des pépinières forestières du Québec, des comités techniques de certaines pépinières, des chercheurs et des étudiants gradués.

7. Références bibliographiques

- Gingras, B.M., 2011. *Risques liés à l'utilisation de la silice : existe-t-il des alternatives ?* Dans : Colas, F. et M.S. Lamhamedi (édit.). *Production de plants forestiers au Québec : la culture de l'innovation*. Colloque de transfert de connaissances et de savoir-faire. Carrefour Forêt Innovations. 4-6 octobre 2011. Québec, QC. p. 21.
<https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Recueil-resume-carrefour.pdf>
- ISTA, 2009. *Règles Internationales pour les Essais de Semences 2009*. Bassersdorf (Suisse). 144 p.
- Lamhamedi, M.S., 2013. *Principaux facteurs et techniques culturales affectant la germination des semences et la croissance des plants en pépinière forestière — Les semences forestières : un maillon clé des plantations de grande valeur*. Atelier sur les semences, Berthier, QC. 3-4 décembre 2013. p. 22-25. https://mffp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche/atelier-conference-decembre-2013/pdf/Presentation_04_Lamhamedi.pdf
- Lamhamedi, M.S., 2014a. *Principaux effets de la variabilité de la qualité de la silice sur la germination, la croissance et la nutrition minérale des plants en pépinière forestière*. Activité de transfert de connaissances auprès du Comité de gestion de la production de semences et de plants forestiers de la Direction générale de la production de semences et de plants forestiers (DGPSPF). 25 septembre 2014. Québec, QC. 54 p.
- Lamhamedi, M.S., 2014b. *État actuel de nos connaissances sur les effets de la variabilité de la qualité de la silice sur la germination, la croissance et la nutrition minérale des plants en pépinière forestière*. Activité de transfert de connaissances auprès des pépinières forestières gouvernementales du Québec. 15 octobre 2014. Grandes-Piles, QC. 69 p.
- Lamhamedi, M.S., 2015. *Variabilité de la qualité de la silice et comparaison des effets de la silice et de la calcite sur la croissance et la nutrition minérale des plants en pépinière forestière*. Journée de transfert de connaissances de l'Office des producteurs de plants forestiers du Québec. 17-19 février 2015, Québec, QC. 63 p.
- Lamhamedi, M.S., 2022. *Diagnostic de la problématique de production et de croissance des plants à la pépinière de Normandin*. Activité de transfert de connaissances auprès du personnel de la pépinière de Normandin et de la Direction de l'expertise et de la coordination de la Direction générale de la production de semences et de plants forestiers (DGPSPF). 3 mars 2022. Québec, QC. 73 p.
- Lamhamedi, M.S. et B.M. Gingras (éds.), 2009. *Session de formation sur la nutrition minérale des plants forestiers dédiée aux pépinières forestières du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Recueil des conférences (CD-ROM).

- Lamhamedi, M.S., G. Lambany, H.A. Margolis, M. Renaud, L. Veilleux et P.Y. Bernier, 2001. *Growth, physiology and leachate losses in Picea glauca seedlings (1+0) grown in air-slit containers under different irrigation regimes*. Can. J. For. Res. 31(11): 1968-1980. <https://doi.org/10.1139/x01-134>
- 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. 28 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire154.pdf>
- Lamhamedi, M.S., P. Desjardins, M. Renaud, et L. Veilleux, 2013. *Techniques culturales de production pour améliorer la qualité morpho-physiologique des plants forestiers et la rentabilité des pépinières forestières au Québec*. Formation et transfert de connaissance, d'expertise et de savoir-faire présentés auprès des pépinières forestières du Québec membres de la Fédération québécoise des coopératives forestières. 6 novembre 2013. Québec, QC. 130 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Journee-formation-pepiniere-for-fqcf.pdf>
- Lamhamedi, M.S., M. Renaud et I. Auger, 2020a. *Stimulation par la calcite granulaire de la colonisation ectomycorhizienne des racines et de la croissance des plants d'épinette blanche (2+0) dans les substrats tourbeux en pépinière forestière*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 182. 34 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/MRF-182.pdf>
- Lamhamedi, M.S., M. Renaud, I. Auger et J. A. Fortin, 2020b. *Granular calcite stimulates natural mycorrhization and growth of white spruce seedlings in peat-based substrates in forest nursery*. Microorganisms 8: 1088. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8071088>
- Lamhamedi, M.S., M. Renaud et I. Auger, 2021. *Granular calcite: A new cultural practice for the improvement of the physicochemistry of the peat substrate, growth and morphophysiological quality of white spruce seedlings in forest nursery*. Land 10: 1-27. <https://doi.org/10.3390/land10070661>
- Landis, T.D., R.W. Tinus et J.P. Barnett, 1989. *The container tree nursery manual. Vol. 4. Seedling nutrition and irrigation*. U.S.D.A., Forest Service, Agric. Handbook. 674. 119 p. Washington, DC (États-Unis). <https://rngr.net/publications/ctnm/volume-4>
- Qualtiere, E.J., 2008. *Variation in germination response to temperature among collections of three conifers from the mixed wood forest*. Thèse de maîtrise. Université de la Saskatchewan. Saskatoon, SK. 145 p. <https://harvest.usask.ca/handle/10388/etd-05152008-134225>
- South, D.B., 2017. *Optimum pH for growing pine seedlings*. Tree Planters' Notes 60(2): 49-62. https://rngr.net/publications/tpn/60-2/optimum-ph-for-growing-pine-seedlings/at_download/file

- Thomas, P.A. et R.W. Wein, 1985. *Water availability and the comparative emergence of four conifer species*. Can. J. Bot. 63(10): 1740-1446. <https://doi.org/10.1139/b85-244>
- Timmer, V.R. et G. Parton, 1982. « Monitoring nutrient status of containerized seedlings. » Dans : *Proceedings*, Ontario Ministry of Natural Resources Nurseryman's Meeting; 1982 June. Thunder Bay, ON. p. 48-58.
- Tisdale, S. L., W.L. Nelson et J.D. Beaton, 1985. *Soil fertility and fertilizers*. Macmillan Publishing Company. New-York, NY (États-Unis). 754 p.
- Wang, B.S.P., 1973. *Laboratory germination criteria for red pine (Pinus resinosa Ait.) seed*. Proceedings of the Association of Official Seed Analysts **63**: 94-101. <https://www.jstor.org/stable/23432500>
- Wang, B.S.P. et F. Ackerman, 1983. *A new germination box for tree seed testing*. Environnement Canada, Service canadien des forêts, Petawawa National Forestry Institute. 15 p. <https://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/6865.pdf>

Mohammed S. Lamhamedi, ing.f., M. Sc., Ph. D.

Direction de la recherche forestière

Correspondance :

Mohammed Lamhamedi
Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein, bureau B.1.105
Québec (Québec) G1P 3W8
Tél : 418 643-7994, poste 706553
Courriel : mohammed.lamhamedi@mffp.gouv.qc.ca

On peut citer tout ou partie de ce texte en indiquant la référence. Citation recommandée :

Lamhamedi, M.S. et M. Renaud, 2022. *La face cachée de la silice de mauvaise qualité : diagnostic et conséquences sur la qualité morphophysiological des plants dans les pépinières forestières au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis technique SGEF-27. 29 p.

Annexe

Exemple d'un certificat d'analyse (analyses chimique et granulométrique) émis par le laboratoire de chimie organique et inorganique de la Direction de la recherche forestière sur des échantillons provenant de lots de silice obtenus d'un fournisseur avant l'achat, à la demande d'un pépiniériste. Les modalités d'analyses de chaque échantillon sont indiquées dans la section « Remarques particulières », en bas à gauche.

LABORATOIRE de CHIMIE ORGANIQUE INORGANIQUE		Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs Direction de la recherche forestière Laboratoire de chimie organique et inorganique										Certificat d'analyse No. 10764-A					Émission du certificat 2016-09-16		Service génétique, reproduction et écologie				
2700, rue Einstein, Québec, (Québec), G1P 3W8 Tél.: (418) 643-7994 Fax: (418) 643-2165 D. Langlois poste 6582, C. De Blois poste 6601 laboratoire.chimie.forests@mffp.gouv.qc.ca		Denis Langlois, chimiste										Date d'expédition		2700, rue Einstein									
												No. 10764-A		Québec									
laboratoire.chimie.forests@mffp.gouv.qc.ca		Carol De Blois, chimiste										Courrier : <input type="radio"/> postal <input type="radio"/> électronique		Lamhamedi Mohammed									
												No. 10764-A		Lamhamedi Mohammed									
												Classeur : Coa10764-A.xls											
												Réception des échantillons 2016-09-13											
												Numéros de demande 11267											
												Nature Silice											
No. méthoc	pH		Cond.	P	K	Ca	Mg	Mn	Cu	Zn	Al	Fe	Mo	Na	B	S	> 2.00 mm	> 1.00 mm	> 0.425 mm	< 0.425 mm	M. totale		
	CaCl ₂	H ₂ O	µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	%	< 2.00 mm	< 1.00 mm	%	g		
	V-01	V-01	V-03	IV-16	IV-16	IV-16	IV-16	IV-16	IV-16	IV-16	IV-16	IV-16	IV-16	IV-16	IV-16	IV-16	VI-12	VI-12	VI-12	VI-12	VI-12		
625423	7,61	8,96	106	0,1	0,6	25,9	2,5	0,3	< 0,1	< 0,1	1,1	0,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1	2,3	65,2	33,7	0,2	0,9	297,28		
625423,1				< 0,1	0,3	186	6,9	1,6	< 0,1	0,6	0,3	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	2,8							
625424	7,75	9,00	162	< 0,1	0,7	30,5	1,9	0,2	< 0,1	< 0,1	0,7	0,5	< 0,1	1,0	< 0,1	5,6	90,1	9,1	0,2	0,6	299,91		
625424,1				< 0,1	0,7	182	4,7	1,3	< 0,1	0,1	0,3	0,9	< 0,1	1,2	< 0,1	5,8							
625425	7,76	9,02	179	< 0,1	0,8	31,6	2,0	0,2	< 0,1	< 0,1	0,8	0,4	< 0,1	1,0	< 0,1	6,9	88,8	10,4	0,2	0,6	295,03		
625425,1				< 0,1	0,6	166	4,1	1,2	< 0,1	< 0,1	0,3	0,8	< 0,1	1,0	< 0,1	4,6							
625426	7,67	8,79	165	< 0,1	0,8	29,6	2,0	0,2	< 0,1	< 0,1	0,7	0,4	< 0,1	1,0	< 0,1	5,7	91,0	8,3	0,2	0,5	300,48		
625426,1				< 0,1	0,7	183	4,8	1,4	< 0,1	0,1	0,3	1,0	< 0,1	1,3	< 0,1	7,0							
625427	7,44	8,61	167	< 0,1	0,8	31,0	2,0	0,2	< 0,1	< 0,1	0,8	0,5	< 0,1	1,1	< 0,1	5,7	90,2	8,9	0,3	0,7	299,74		
625427,1				< 0,1	0,6	175	4,0	1,3	< 0,1	0,1	0,3	0,9	< 0,1	1,1	< 0,1	5,4							
625428	7,66	8,89	168	< 0,1	0,7	29,0	1,8	0,2	< 0,1	< 0,1	0,7	0,5	< 0,1	1,0	< 0,1	6,1	89,1	10,2	0,2	0,5	300,05		
625428,1				< 0,1	0,6	171	4,7	1,3	< 0,1	0,1	0,3	2,0	< 0,1	1,2	< 0,1	6,4							
limit. détec.			< 2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1							
Remarque(s) générale(s)												Remarque(s) particulière(s)											
1 - Les résultats ne se rapportent qu'aux échantillons soumis à l'analyse.												pH : 20 g / 40 mL d'eau											
2 - Ce rapport ne doit pas être reproduit sans l'autorisation écrite du laboratoire.												Conductivité : 15 g / 60 mL d'eau											
3 - Le certificat original signé par le chimiste est disponible sur demande.												Numéro X (Métaux) : 15 g / 60 mL d'eau; agitation constante durant 30 minutes											
4 - Demande no : 11267 provenance : Silice pour pépinière xxxxx; septembre 2016. no projet : na												Numéro X.1 (Métaux) : 25 g / 100 mL HCl 0.01 M; agitation intermittente durant 30 minutes											
												Toutes les analyses ont été réalisées sur la Silice tel que reçue (sans traitement préalable).											