

# Gestion opérationnelle de l'évolution de la qualité des lots de semences forestières à l'aide de la mesure de l'activité de l'eau

Fabienne COLAS, Isabelle AUGER, Patrick BALDET<sup>1</sup>, Michèle BETTEZ<sup>2</sup> et Anne SAVARY<sup>3</sup>

F.D.C. 232.3  
L.C. SD 402.45

## Résumé

La gestion optimisée d'une banque de semences requiert un portrait représentatif de la qualité réelle des lots conservés. Il importe d'estimer la durée de validité d'un test de germination. Pour valider la grille empirique de fréquence des tests basée sur l'historique des lots entreposés au Centre de semences forestières de Berthier (Québec), des sources de semences ont été identifiées et récoltées à plusieurs reprises, puis leur germination a été évaluée annuellement. Les principales essences de reboisement au Québec ont été visées : l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss), l'épinette noire (*P. mariana* [Mill.] B.S.P.), l'épinette de Norvège (*P. abies* [L.] H. Karst.), le pin blanc (*Pinus strobus* L.) et le pin gris (*P. banksiana* Lamb.).

L'état hydrique des semences est un élément clé pour leur conservation. La mesure de l'activité de l'eau (AE) permet de caractériser, plus finement que la teneur en eau, l'état hydrique des semences et son évolution. Ce nouvel outil a l'avantage d'être rapide, facile et surtout, non destructif. Des mesures d'AE effectuées sur les lots du projet sur la fréquence des tests ont révélé une modification significative de leur état hydrique, conséquence des ouvertures répétées des contenants. Bien qu'elle n'ait pas influencé la germination, cette modification de l'état hydrique a altéré les conditions de conservation des lots. Les auteurs discutent du rôle grandissant de la mesure de l'AE dans la gestion des banques de semences et des précautions à prendre lors des prélèvements dans les contenants en conservation.

Mots clés : graine, germination, conservation, fréquence des tests, activité de l'eau, teneur en eau.

## Abstract

*Optimized seed bank management requires a representative portrait of the true quality of the conserved seedlots. This implies knowing how long germination test results remain valid. To validate the empirical grid for germination test frequency which was based on seedlot history at the Berthier Tree Seed Centre (Québec), seed sources were identified and harvested repeatedly; seedlot germination was then assessed annually. The principal coniferous species used in Quebec for reforestation were examined: white spruce (*Picea glauca* [Moench] Voss), black spruce (*P. mariana* [Mill.] B.S.P.), Norway spruce (*P. abies* [L.] H. Karst), white pine (*Pinus strobus* L.) and jack pine (*P. banksiana* Lamb.).*

*Seed water status is a key element for their conservation. Water activity measurement characterizes seed water status and its possible evolution more precisely than water content measurement. This new tool has three main advantages: it is fast, easy to obtain and, above all, non-destructive. Water activity measurements revealed a significant change in the water status of the studied seedlots, as a consequence of the repeated openings of the containers. Though it did not result in a reduction in germination, this change in seed water status altered the seedlot conservation conditions. The authors discuss the increasing role of water activity in seed bank management and the precautions required when sampling in conservation containers.*

*Keywords: seed, germination, conservation, retest frequency, water activity, water content.*

<sup>1</sup> Irstea, Unité Écosystèmes forestiers, Domaine des Barres, 45 290 Nogent sur Vernisson (France).

<sup>2</sup> Centre de semences forestières de Berthier, 1690 chemin Grande-Côte, Berthier (Québec) J0K 1A0.

<sup>3</sup> Division des semences forestières, Direction générale des pépinières et stations piscicoles, 880 chemin Sainte-Foy, 8<sup>e</sup> étage, Québec (Québec) G1S 4X4.



## Introduction

La production de semences forestières est aléatoire et variable selon les années (WANG *et al.* 1994). Afin d'assurer un approvisionnement régulier pour la production de plants destinés au reboisement, il est indispensable de stocker les graines. Une conservation durable des semences permettant le maintien d'un pouvoir germinatif maximal est donc un enjeu crucial. La plupart des semences sont dites orthodoxes, c'est-à-dire qu'elles sont tolérantes à la dessiccation (CÔME et CORBINEAU 2006). C'est le cas des graines des essences de conifères utilisées pour le programme de reboisement au Québec. Puisqu'elles peuvent être séchées, on peut les conserver même à de très faibles températures (WANG *et al.* 1994). En général, la qualité des semences conservées pour une longue durée est évaluée à l'aide de tests de germination (SIMPSON *et al.* 2004). Ces tests sont cependant destructifs, et donc, consommateurs de graines. Le défi consiste maintenant à développer de nouvelles méthodes rapides, non destructives et peu coûteuses pour évaluer la qualité des semences.

Plusieurs critères influencent la dynamique de conservation des graines (WANG *et al.* 1994, RAO *et al.* 2006) : la qualité initiale des semences lors de la récolte, les processus d'extraction et de manipulation des graines dans le centre de semences, l'état hydrique lors de la mise en conservation, la température et la méthode de conservation. Ces trois derniers critères sont les plus importants (KOLOTELO *et al.* 2001).

Connaître le statut hydrique des graines avant leur mise en conservation est crucial puisque la teneur en eau (TE) et la température de conservation ont un effet important sur la conservation des graines (SIMPSON *et al.* 2004). La TE est cependant le facteur prépondérant (PROBERT 2003), notamment lors d'une conservation à +3 °C (SIMPSON *et al.* 2008). À cet effet, une mesure précise de la TE est la tâche la plus importante dans la conservation des graines (PROBERT 2003).

En raison de l'effet significatif de la TE sur la qualité de la conservation des graines, il est important de connaître son évolution au cours du temps. Or la mesure de la TE est destructive et consommatrice de graines (environ 8 à 10 g par essai selon les normes de l'ISTA [2009]). Cette consommation de graines n'est pas compatible avec une conservation d'échantillons précieux et de volume réduit, comme c'est particulièrement le cas avec les banques de conservation *ex situ*.

Bien qu'utilisée très couramment, la TE n'est pas adéquate pour exprimer l'état de l'eau dans la plupart des tissus (SUN 2002). Rappelons que la TE est mesurée, le plus souvent, pour les graines entières même si on sait que les différentes composantes de la graine (embryon, tissus de stockage) n'ont pas la même composition chimique et donc des affinités pour l'eau différentes (MC DONALD 2007). La mesure de l'activité de l'eau (AE), quant à elle, permet d'analyser qualitativement les relations hydriques au sein de produits (SUN 2002). Le concept d'AE a été défini par SCOTT (1953) pour l'industrie agro-alimentaire. Dans une graine, l'AE est une image de l'intensité des connexions entre l'eau et les autres molécules telles que les glucides, les lipides et les protéines. L'AE peut être vue comme le contenu en eau « efficace », qui est thermodynamiquement disponible pour des processus variés dans les cellules. Pour la survie des organismes soumis à un stress hydrique (ici lors du séchage des graines), cette eau « efficace » est encore plus importante que la quantité totale d'eau dans le tissu (SUN 2002).

La mesure de l'AE permet une caractérisation fine de l'évolution de l'état hydrique des graines au cours de la conservation. Elle rend ainsi compte plus précisément que la TE des évolutions physiologiques dans les graines (VERTUCCI et ROOS 1990). De plus, la mesure de l'AE a trois principaux avantages opérationnels : elle est facile d'utilisation, rapide, et surtout non destructive. Depuis quelques années, grâce à la disponibilité de matériel de mesure plus accessible, il est plus facile de mesurer l'AE des semences (PROBERT 2003). Pour tout échantillon donné, à une température donnée, il existe une relation d'équilibre entre l'AE et la TE qui est décrite par un isotherme de sorption. Cet isotherme indique le degré de liaison de l'eau dans le tissu et, de là, les propriétés thermodynamiques et le niveau d'activité physiologique qui peuvent en découler (VERTUCCI et ROOS 1990, PROBERT 2003, RAO *et al.* 2006). Les isothermes de sorption permettent de définir les trois niveaux de liaison de l'eau : eau de constitution (très fortement liée), eau moyennement liée et eau libre (VERTUCCI et ROOS 1990, CÔME et CORBINEAU 2006, MC DONALD 2007). L'occurrence des réactions de dégradation des matières organiques est liée à l'AE de ces matières; les principales ont lieu à partir d'une AE de 0,65, soit lorsqu'on retrouve de l'eau libre (LABUZA *et al.* 1972).

Les isothermes de sorption permettent de déterminer l'AE optimale pour la conservation des graines d'une espèce donnée ainsi qu'une TE moyenne résultante.

VERTUCCI et ROOS (1990) avancent même que l'AE serait plus appropriée que la TE pour déterminer le statut hydrique optimal pour la conservation des graines.

La caractérisation hydrique des graines à l'aide d'isothermes de sorption a surtout été réalisée pour des espèces d'importance économique comme les céréales et les essences potagères (ROBERTS et ELLIS 1989, WALTERS *et al.* 1998). Parmi les essences forestières, seul l'arganier (*Argania spinosa* L.) a été étudié, non pas pour la conservation des graines en vue d'une future germination, mais pour déterminer les conditions de séchage en vue de leur consommation (IDLIMAM *et al.* 2008).

Au Québec, la caractérisation hydrique des principales essences utilisées pour le reboisement a été effectuée et a permis de déterminer l'AE optimale pour la conservation des graines de ces essences. Une publication est en cours de rédaction.

Pour vérifier les conditions de conservation des graines dans des banques *ex situ*, des évaluations très régulières du pouvoir germinatif des graines sont requises (FAO et IPGRI 1994), ce qui peut générer un volume très important de travail. Une façon de prédire la qualité de la conservation des lots de semences à moyen et long terme est de bâtir des équations de dégradation de la qualité des graines (ROBERTS et ELLIS 1977). Un tel travail a été réalisé pour de très nombreuses espèces principalement agricoles (ELLIS et ROBERTS 1980, 1981). Cela dit, le travail avec les essences forestières est compliqué du fait de l'hétérogénéité dans la maturité des graines observée lors des récoltes, de leur importante diversité génétique et donc phénotypique, ainsi que de leurs divers degrés de dormance (BONNER 1999). De plus, lorsque les graines sont conservées à des fins opérationnelles seulement, les équations de dégradation ont un intérêt limité, puisque les graines sont rarement conservées plus de 10 ans (BONNER 1999).

Le Centre de semences forestières de Berthier (CSFB)<sup>1</sup> est l'unique centre de traitement et de conservation des semences forestières du Québec. Il relève de la Direction générale des pépinières et des stations piscicoles (DGPSP) du ministère des Ressources naturelles (MRN). Toutes les graines qui y sont traitées et entreposées sont destinées à la production de plants pour le reboisement.

Annuellement, le CSFB traite près de 1 800 hl de cônes d'essences résineuses et 250 hl de semences de feuillus, ce qui correspond à un nombre annuel de 100 à 160 nouveaux lots (BRAULT, N., comm. pers.).

Les lots de semences entreposés au CSFB sont livrés aux 19 pépinières publiques et privées qui sont chargées de produire, en moyenne, les 150 millions de plants destinés au reboisement de la province. Le nombre total de semences allouées pour la production de plants dépend à la fois du facteur d'ensemencement<sup>2</sup> utilisé et de la germination du lot. Afin de livrer la quantité de semences nécessaire et suffisante à l'atteinte des objectifs de production fixés, le CSFB indique aux pépiniéristes la capacité germinative de chaque lot de semences livré. Celle-ci est déterminée dès l'extraction, et réévaluée au cours de la conservation.

Jusqu'en 2000, chaque lot de semences était testé avant d'être livré à une pépinière si son dernier test de germination datait de plus d'un an. Cette procédure était lourde; elle générerait beaucoup de travail ainsi que des pics d'activité au CSFB, notamment au printemps avant l'allocation des lots, plutôt que de permettre une répartition uniforme du travail durant l'année. De plus, cette approche ne permettait pas d'avoir un portrait d'ensemble réaliste de la qualité des semences conservées, puisque les lots de semences qui n'étaient pas alloués n'avaient pas de « mise à jour » de leur capacité germinative. Or, un portrait global est indispensable à une planification optimale des besoins de récoltes. En 1999, une première grille empirique de fréquence des tests de germination, basée sur l'historique des lots et l'expérience de l'équipe du CSFB, a été conçue pour toutes les essences traitées au CSFB. L'année suivante, la Direction de la recherche forestière (DRF) a été chargée de mettre à jour cette grille de fréquence, afin de s'assurer de sa fiabilité.

Le premier objectif de l'étude était de déterminer la durée moyenne de validité du résultat d'un test de germination, afin d'optimiser l'intervalle de temps entre deux tests, sans nuire à la qualité et à la précision des données utilisées pour l'allocation des semences destinées aux pépinières forestières. Les principales essences résineuses entreposées au CSFB ont été étudiées : l'épinette blanche (EPB : *Picea glauca* [Moench] Voss), l'épinette noire (EPN : *P. mariana* [Mill.] B.S.P.), l'épinette de Norvège (EPO : *P. abies* [L.] H. Karst), le pin blanc (PIB : *Pinus strobus* L.) et le pin

<sup>1</sup> Site internet : <http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/semences/semences-berthier.jsp>.

<sup>2</sup> Facteur d'ensemencement : nombre de semences viables allouées par cavité.

gris (PIG : *P. banksiana* Lamb.). Ces cinq essences représentent près de 97 % des semences utilisées annuellement pour la production de plants forestiers au Québec. Des tests de germination étaient prévus annuellement sur un nombre important de lots de ces essences. Le second objectif de l'étude était d'évaluer l'évolution de la qualité des différents lots de semences à l'aide de la mesure de l'activité de l'eau.

## 1. Matériel et méthodes

### 1.1 Sélection des sources et récolte des graines

La division de semences forestières de la DGPSP a sélectionné les sources de semences (provenances) en fonction de leur intérêt pour la production de plants et organisé les récoltes. La localisation des sources de semences sélectionnées, par essence, est illustrée à la figure 1.

Le nombre de sources, variable selon les essences, est représentatif de l'utilisation des essences dans le programme de reboisement du Québec. Trois récoltes ont été prévues par source, si possible à deux années d'intervalle. Une importance particulière a été accordée à l'EPB, en raison des variations annuelles observées dans sa capacité germinative par le passé. Les récoltes ont débuté en 2000 pour toutes les essences. En raison des améliorations importantes apportées aux méthodes d'extraction des semences au CSFB entre 2001 et 2003 (BETTEZ et BRAULT 2004), il a été convenu de ne pas tenir compte des résultats obtenus avec les lots ayant été récoltés avant 2003, pour toutes les essences sauf l'EPN, pour laquelle les conditions d'extraction étaient déjà optimales. De nouvelles récoltes de semences ont donc été réalisées à partir de 2003 pour l'EPB, l'EPO, le PIB et le PIG. Le nombre de sources est variable selon les essences (de 3 pour l'EPO à 16 pour l'EPN), tout comme le nombre de récoltes par source (de 1 à 4). Ces informations sont présentées dans le tableau 1.

Bien que le nombre de sources soit presque identique pour l'EPB et l'EPN (16 et 15, respectivement), le nombre de lots est plus élevé pour l'EPN (35) que pour l'EPB (25). La fructification de l'EPB est très irrégulière; c'est pourquoi toutes les sources d'EPB n'ont pu être récoltées aussi souvent que requis dans l'étude. Cette difficulté ne s'est pas présentée pour les autres essences.

### 1.2 Tests de germination

Les tests de germination requis par l'étude ont tous été réalisés au CSFB. Tous les lots des différentes sources ont été récoltés à l'année  $x$ . Le test de germination initial était effectué l'année  $x+1$ , puisque les extractions sont faites l'hiver suivant la récolte. Aux environs de la date anniversaire du premier test de germination, le suivant a été commencé afin de maintenir à un an l'intervalle entre chaque test. Il était prévu que chaque lot soit analysé durant 10 ans. Dans tous les cas, le dernier test de germination pris en compte dans l'étude date de 2008, même si la durée de conservation était inférieure à 10 ans.

La méthode utilisée pour les tests de germination est celle en vigueur au CSFB (BRAULT *et al.* 1996) et qui respecte les normes internationales édictées par l'ISTA (2009). Ainsi, chaque test est constitué de 4 répétitions de 100 graines de chaque lot évalué. La germination se déroule dans un germeoir Conviro G30 (Winnipeg, Canada) ayant les réglages suivants : 16 h de lumière, alternance de température (20/28 °C), humidité relative 85 %. Certains paramètres du test varient selon les essences et sont résumés dans le tableau 2.

Les répétitions sont réparties au hasard dans 4 plats de germination différents à raison de 100 graines / plat / lot. On retrouve 4 lots différents par plat, pour un total de 400 graines par plat de germination. Pour les essences devant être stratifiées avant d'être mises à germer (EPB et PIB), la stratification a la même durée que celle du test (respectivement 21 et 28 jours). Les comptages sont effectués deux fois par semaine à des jours fixes (ces jours varient selon le responsable du test). À la fin du test, le pourcentage final de germination ainsi que la valeur germinative (index de vigueur combinant la vitesse de germination et le pourcentage final de germination [CZABATOR 1962]) sont déterminés.

Le pourcentage final de germination correspond au nombre total de graines ayant germé pendant la durée du test de germination, divisé par le nombre total de graines mises en germination. Sa précision est vérifiée avec la table des écarts acceptables entre les répétitions de l'ISTA (2009).

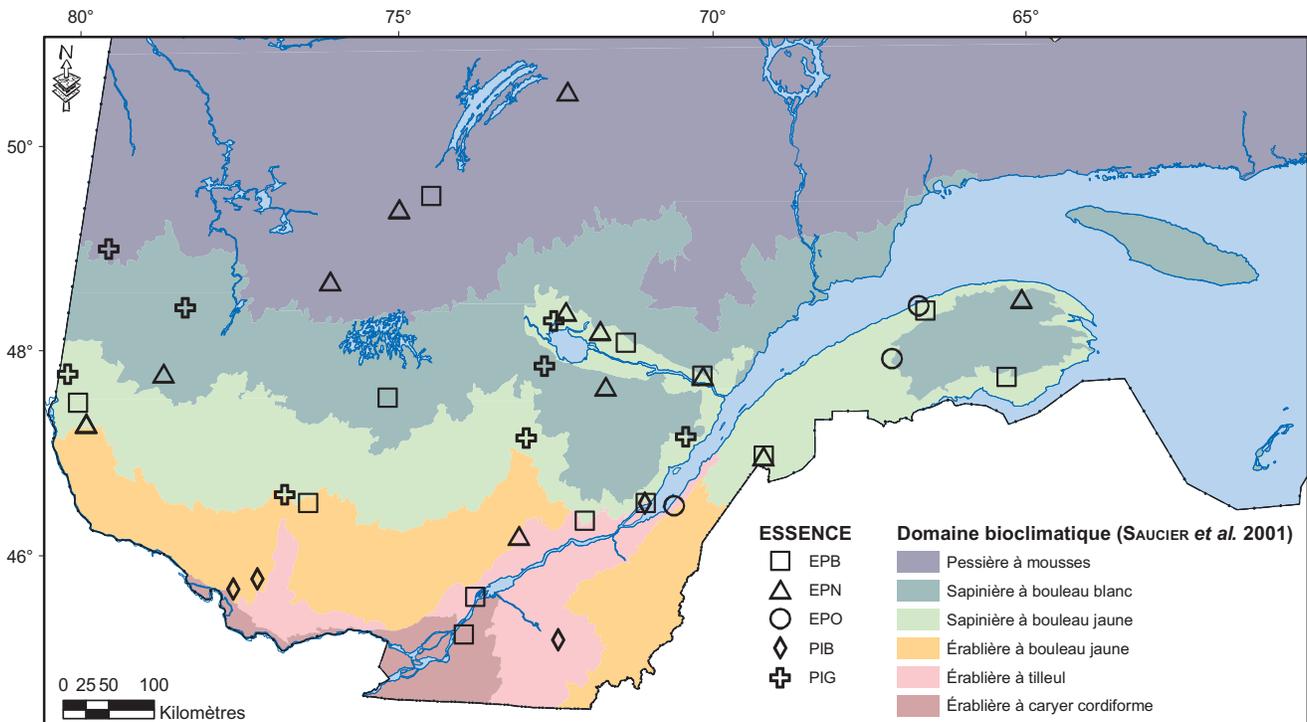


Figure 1. Carte illustrant la répartition, sur le territoire québécois, des sources de semences des cinq essences étudiées dans le projet fréquence des tests (EPB : épinette blanche, EPN : épinette noire, EPO : épinette de Norvège, PIB : pin blanc et FIG : pin gris).

Tableau 1. Description des sources de semences sélectionnées pour l'étude sur la fréquence des tests de germination, en fonction de l'essence, de leur niveau d'amélioration génétique, du nombre de récoltes et de lots, ainsi que du nombre de tests de germination effectués.

Essence	Nombre de sources			Nombre de récoltes / source	Années de récolte	Nombre de lots <sup>1</sup>	Nombre de tests de germination effectués
	Améliorées	Non améliorées	Total				
EPB	15	1	16	1 à 4	2003, 2004, 2005, 2006	25	117
EPN	13	2	15	1 à 3	2000, 2001, 2002, 2003, 2004	35	226
EPO	3	0	3	1	2003	3	18
PIB	4	0	4	1 ou 2	2003, 2004	5	22
FIG	8	0	8	1 à 3	2003, 2004, 2005	21	76

<sup>1</sup> Le nombre de lots dépend du nombre de sources sélectionnées et du nombre de récoltes réalisées par source.

**Tableau 2. Conditions de réalisation des tests de germination, en germe, pour les essences étudiées dans le projet sur la fréquence des tests.**

Essence	Stratification <sup>1</sup> - durée	Durée du test (jours)
EPB	Oui – 21 jours	21
EPN	Non	21
EPO	Non	21
PIB	Oui – 28 jours	28
PIG	Non	14

<sup>1</sup> La stratification est une technique de levée de dormance des graines par le froid. Avant le test de germination, les graines sont déposées sur un substrat humide et maintenues au froid pour une durée variable selon les essences (CÔME et CORBINEAU 2006), les graines sont ensuite mises à germer.

Plus la valeur germinative (VG) est élevée, plus le lot germe rapidement. Les valeurs germinatives sont très différentes d'une essence à l'autre, en raison de la vitesse de germination propre à chaque essence et de la durée du test de germination. Le suivi de la VG a été retenu en raison de sa pertinence pour évaluer les effets de la conservation : lorsque les graines vieillissent, leur vigueur (ou VG) décline avant leur pourcentage de germination (SIMPSON *et al.* 2008).

### 1.3 Durée de conservation

Selon le protocole, la germination de chaque lot de semences de chaque source devait être évaluée tous les ans durant 10 ans. Pour assurer qu'une quantité suffisante de graines soit disponible tout au long de l'essai, la quantité de graines nécessaire pour la réalisation de tous les tests prévus pour le projet a été réservée, soit 20 000 semences viables<sup>1</sup> par lot. Ces graines ont été mises à part dans un contenant qui a la même forme que le contenant régulier, mais de volume deux fois moins important, soit 10 litres au lieu de 20. Les contenants sont conservés au CSFB à la même température (-3 °C). Selon les essences, la proportion du volume du contenant occupé par les semences variait de 0,4 % pour l'EPN à 6,3 % pour le PIB. Cette différence est due aux dimensions des semences qui sont différentes selon les essences.

En raison de la fin de l'essai en 2008, la durée de conservation des lots de semences a été variable selon les essences. Elle s'est échelonnée de 3 à 7 ans pour l'EPN, de 1 à 5 ans pour l'EPB, de 4 à 5 ans pour le PIB, de 3 à 5 ans pour le PIG; elle a été de 5 ans pour les lots d'EPO.

<sup>1</sup> Le nombre de graines viables dans un lot est calculé en divisant le nombre total de graines par le pourcentage de germination du lot.

### 1.4 Mesure de l'activité de l'eau et de la teneur en eau

Bien que la mesure de l'AE n'ait pas fait partie des tests de qualité au CSFB lors de l'initiation de l'essai, puisque son implantation opérationnelle date de 2008, elle a été ajoutée dès lors dans le suivi de tous les lots du projet sur la fréquence des tests (BALDET *et al.* 2009, BALDET et COLAS 2012).

La mesure de l'AE s'effectue à l'aide d'un hygromètre Hygrolab® (Rotronic, Suisse) sur lequel est branchée une cellule spécialisée pour la mesure de l'activité de l'eau AW-DIO (Rotronic, [Figure 2]). L'échantillon d'environ 1 g de graines est placé dans une soucoupe à température ambiante, qui est ensuite recouverte avec la sonde. La mesure est obtenue en une dizaine de minutes environ. Comme la mesure de l'AE est non destructive, les graines peuvent ensuite être remises dans le contenant de conservation.

Pour bien définir le comportement des essences en regard de l'AE, la caractérisation hydrique [détermination des seuils des différents états de l'eau dans une matière (BALDET 2006)] des trois principales essences utilisées dans le programme de reboisement du Québec avait été préalablement effectuée (COLAS *et al.* 2010). Cette caractérisation a permis de déterminer l'AE optimale de conservation et la teneur en eau (TE) résultante. Les données obtenues (non encore publiées) sont présentées dans le tableau 3.

L'AE n'a été mesurée qu'une seule fois, en 2008, pour tous les lots d'EPB, EPN et PIG, après une durée de conservation variable selon les lots. À l'époque, ces trois essences étaient les seules à avoir été caractérisées au niveau hydrique (COLAS *et al.* 2008).

**Tableau 3. Valeur moyenne d'activité de l'eau (AE) optimale de conservation et teneur en eau (TE) résultante déterminée pour l'épinette noire (EPN), l'épinette blanche (EPB) et le pin gris (PIG).**

Essence	AE optimale de conservation	TE résultante (%)
EPN	0,36 ± 0,01	7,6 ± 0,24
EPB	0,34 ± 0,02	6,4 ± 0,19
PIG	0,36 ± 0,01	7,6 ± 0,21

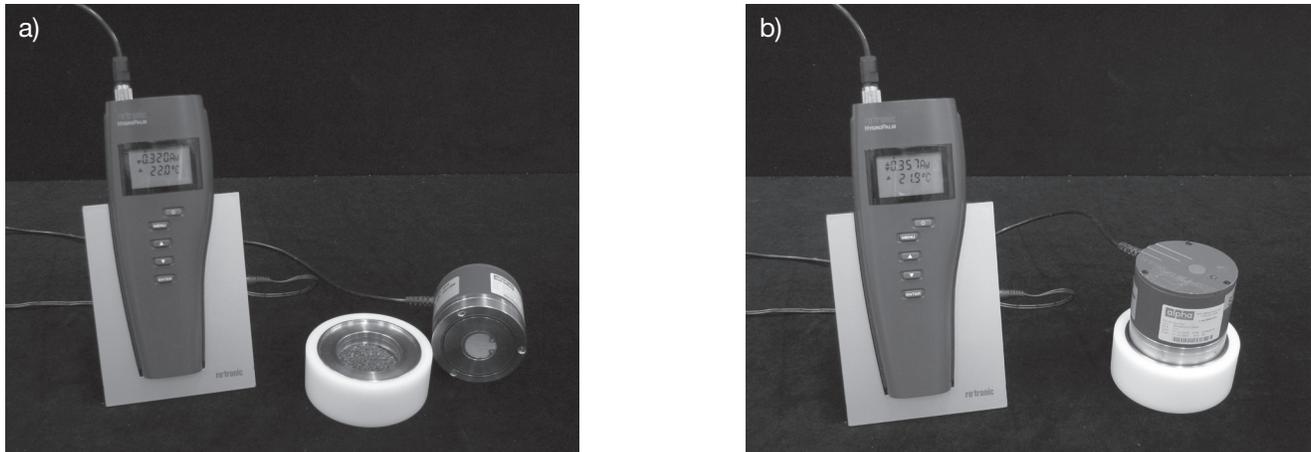


Figure 2. Hygromètre Hygrolab® sur lequel est fixée une sonde AW-DIO (Rotronic, Suisse), et utilisé pour la mesure de l'activité de l'eau d'échantillons de graines. Les graines sont placées dans la soucoupe (a) qui est ensuite recouverte par la sonde (b). Le résultat est obtenu en quelques minutes. Photos DRF.

La TE est déterminée selon les normes ISTA (2009). C'est une mesure destructive. Deux échantillons de 4 à 5 g de graines par lot de graines sont mis à sécher durant 17 heures dans un four préalablement réglé à  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Les graines sont pesées avant et après séchage. La différence permet de calculer la TE massique (Équation 1) :

$$\text{TE}(\%) = \frac{(\text{masse initiale des graines} - \text{masse sèche des graines})}{(\text{masse initiale des graines})} \quad [1]$$

La TE a été déterminée lors de l'entrée des lots dans la banque du CSFB. Elle a été également mesurée en 2008 après une durée de conservation variable selon les lots.

## 1.5 Analyses statistiques

### 1.5.1 Germination

Un modèle linéaire mixte a été utilisé pour modéliser le pourcentage de germination (PG) et la valeur germinative (VG) en fonction du nombre d'années de conservation, tel que représenté par l'équation 2 :

$$y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 x_{ij} + u_{0i} + u_{1i} x_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad [2a]$$

$$\mathbf{u}_i = \begin{bmatrix} u_{0i} \\ u_{1i} \end{bmatrix} \sim \mathbf{N}(\mathbf{0}, \mathbf{G}) \quad [2b]$$

$$\varepsilon_{ij} \sim \mathbf{N}(0, \sigma^2) \quad [2c]$$

où

$y_{ij}$  est le PG (ou la VG) du lot  $i$  à la mesure  $j$ ,

$x_{ij}$  est le nombre d'années de conservation du lot  $i$  à la mesure  $j$ ,

$\beta_0$  et  $\beta_1$  sont les paramètres associés respectivement à l'ordonnée à l'origine et à l'effet linéaire du nombre d'années de conservation,

$u_{0i}$  et  $u_{1i}$  sont les effets aléatoires associés respectivement à l'ordonnée à l'origine et à l'effet linéaire du nombre d'années de conservation,

$\varepsilon_{ij}$  est le terme d'erreur résiduelle.

On présume que la distribution du vecteur des deux effets aléatoires,  $\mathbf{u}_i$ , associé au lot  $i$ , est normale multivariée de moyenne 0 et de variance-covariance  $\mathbf{G}$ , et que la distribution de l'erreur résiduelle est normale de moyenne 0 et de variance  $\sigma^2$ . La procédure MIXED du logiciel SAS/STAT® (SAS INSTITUTE 2009) a été utilisée pour étalonner l'équation 2.

Dans ce modèle, appelé plus précisément modèle à coefficients aléatoires (random coefficients model), les coefficients spécifiques à un lot, décrivant la trajectoire de ce lot dans le temps, peuvent varier

aléatoirement (WEST et al. 2007). Ainsi, la droite de régression de chaque lot,  $(\beta_0 + u_{0i}) + (\beta_1 + u_{1i})x_{ij}$ , dévie autour de la droite de régression moyenne de la population de lots,  $\beta_0 + \beta_1 x$ . Un test unilatéral sur  $\beta_1$  a été utilisé afin de vérifier si le PG et la VG diminuaient en fonction du nombre d'années de conservation. Lorsque le test indiquait que la pente moyenne était inférieure à 0, donc qu'il y avait dégradation, on estimait la dégradation sur la période en multipliant le coefficient  $\beta_1$  [équation 2a] par le nombre d'années de conservation.

### 1.5.2 Activité de l'eau et teneur en eau

Une régression linéaire simple a été effectuée entre l'AE mesurée en 2008 et la durée de conservation du lot, pour l'EPN, l'EPB et le PIG, afin de vérifier si l'AE est reliée à la durée de conservation. Par ailleurs, pour la TE, un test statistique de  $t$  a été utilisé pour vérifier s'il y avait une différence entre la mesure en 2008 et la mesure initiale effectuée lors de l'entrée du lot dans l'inventaire de la banque du CSFB.

## 2. Résultats

### 2.1 Germination

Quelle que soit l'essence, il est difficile d'identifier une tendance claire quant à l'évolution du pourcentage de germination (Figure 3) et de la valeur germinative (Figure 4). On peut observer des variations, que ce soit à la hausse ou à la baisse, au cours du temps pour chacun des lots et chacune des essences.

La relation entre le pourcentage de germination et la durée de conservation n'est pas significative, peu importe l'essence étudiée (Tableau 4). La droite de régression moyenne est relativement stable au cours du temps. Seule la valeur germinative du PIB diminue de façon significative dans le temps (Tableau 4). La dégradation estimée est de 2,3 sur 4 ans (erreur-type = 0,8).

### 2.2 Activité de l'eau et teneur en eau

Alors que la mesure de l'AE a été intégrée au CSFB depuis 2008 seulement, rappelons que la TE est déterminée systématiquement sur tous les lots de semences extraits au CSFB, et ce, depuis plusieurs décennies.

Tableau 4. Test unilatéral sur la pente des modèles du pourcentage de germination et de la valeur germinative en fonction du nombre d'années de conservation par essence.

Variable	Essence	Pente (erreur-type)	Degrés de liberté <sup>1</sup>	Valeur de $t$ <sup>2</sup>	Seuil observé ( $p$ )
Pourcentage de germination	EPN	0,00 (0,05)	40	0,03	0,5137
	EPB	0,17 (0,11)	95	1,55	0,9384
	EPO	-0,11 (0,25)	14	-0,46	0,3256
	PIB	0,42 (0,42)	16	1,01	0,8352
	PIG	0,20 (0,15)	64	1,32	0,9037
Valeur germinative	EPN	0,05 (0,08)	198	0,63	0,7360
	EPB	-0,15 (0,26)	14	-0,58	0,2857
	EPO	-0,15 (0,26)	14	-0,58	0,2857
	PIB	-0,57 (0,20)	16	-2,76	<b>0,0069</b>
	PIG	1,14 (0,51)	66	2,24	0,9857

<sup>1</sup> Degrés de liberté au dénominateur.

<sup>2</sup> Valeur de la statistique  $t$  de Student.

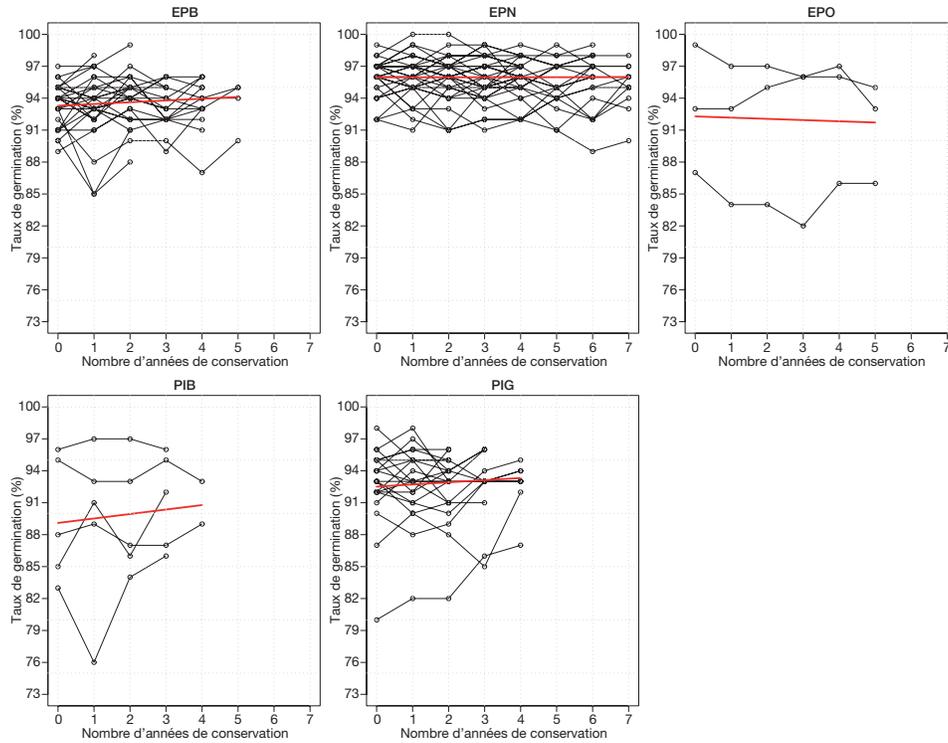


Figure 3. Pourcentage de germination de chaque lot en fonction du nombre d'années de conservation par essence (EPB : épinette blanche, EPN : épinette noire, EPO : épinette de Norvège, PIB : pin blanc et PIG : pin gris). La ligne rouge correspond à la droite moyenne.

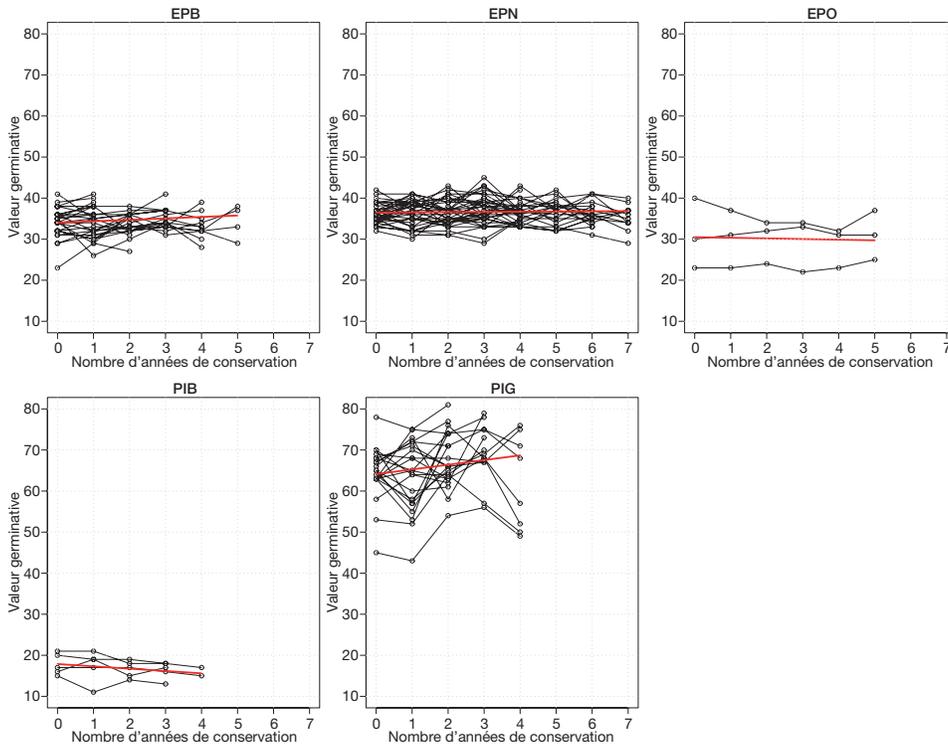


Figure 4. Valeur germinative de chaque lot en fonction du nombre d'années de conservation par essence (EPB : épinette blanche, EPN : épinette noire, EPO : épinette de Norvège, PIB : pin blanc et PIG : pin gris). La ligne rouge correspond à la droite moyenne.

Des mesures d'AE ont été effectuées sur les lots de l'essai dont la durée de conservation était variable. Chaque lot n'a été évalué qu'une seule fois. Les résultats sont présentés à la figure 5. Pour les trois essences analysées, après trois années de conservation, les valeurs d'AE obtenues sont comprises entre 0,7 et 0,8. Pour l'EPB et le PIG, plus le nombre d'années de conservation augmente, plus les valeurs d'AE sont élevées (Figures 5b et 5c;  $p < 0,0001$ ). Dans le cas de l'EPN, essence pour laquelle les lots sont les plus âgés, les valeurs d'AE sont presque le double de la valeur d'AE optimale de conservation (Figure 5a).

L'humidité relative ambiante mesurée dans la chambre de conservation fluctue entre 70 et 80 % en fonction des cycles de fonctionnement de l'unité de réfrigération. Ces valeurs d'humidité relative sont comparables aux valeurs d'AE observées, et tendent à prouver un transfert d'eau vers les graines, au travers des parois des contenants ou lors des multiples ouvertures d'échantillonnage des lots de semences.

Il est impossible de comparer les valeurs d'AE mesurées aux valeurs initiales lors de la mise en conservation des lots, puisque le test d'AE a été implanté après le début de cet essai. Cependant, pour chacun des lots, la TE a été déterminée en 2008 afin de vérifier si celle-ci avait changé par rapport à la valeur initiale déterminée lors de l'extraction (donnée colligée dans le système SEMENCES de la DGPSP). La durée de la conservation, et donc le nombre d'ouvertures des contenants, sont variables selon les essences.

Les valeurs de TE des lots suivis dans le projet sur la fréquence des tests ont fortement augmenté par rapport aux valeurs consignées pour les lots lors de leur entrée en conservation ( $p < 0,0001$  pour les trois essences; Figure 6). Ces augmentations sont toutefois variables selon les essences et les lots. En effet, l'augmentation moyenne ( $\pm$  erreur-type) est de  $6,7 \pm 0,2$  %, de  $2,2 \pm 0,3$  % et de  $3,6 \pm 0,5$  % respectivement pour l'EPN, l'EPB et le PIG. Ceci représente des facteurs d'augmentation de TE variant de 1,7 à 2,5 pour l'EPN, de 1,0 à 1,8 pour l'EPB et de 1,4 à 1,7 pour le PIG.

## 2.3 Comparaison de la teneur en eau avec les lots d'origine

Pour les trois essences analysées, on observe que la TE des graines augmente proportionnellement à la durée de conservation (données non présentées). La TE devient alors en équilibre avec l'humidité relative moyenne régnant dans la chambre froide. Pour les lots dont ont été extraits les échantillons suivis dans l'essai, il faut déterminer si la conservation de même durée dans la banque a également induit une augmentation de TE, et si l'AE mesurée est voisine ou bien supérieure à l'AE optimale déterminée. Rappelons que les graines de tous les contenants, autant ceux du projet sur la fréquence des tests que ceux de la banque de conservation du CSFB, ont été placés dans les mêmes conditions de conservation de température et d'humidité relative. En 2008, certains lots d'origine, utilisés dans le projet et conservés dans la banque du CSFB, étaient épuisés après leur livraison aux pépinières pour la production de plants (notamment tous les lots de PIG). Il ne restait des graines que pour quelques lots d'EPN et d'EPB, sur lesquels la TE a été déterminée (Figure 7).

Les mesures indiquent que la TE des graines des lots conservés dans les lots d'origine de la banque « régulière » du CSFB se maintient au cours de la conservation ( $p > 0,0675$  pour le test de  $t$  pour les deux essences confondues). Il faut noter que ces contenants n'ont pas été ouverts de façon répétée pour faire des prélèvements de semences, comme cela a été le cas pour les contenants du projet sur la fréquence des tests. Les données d'AE et de TE obtenues pour les graines des lots d'origine conservés dans la banque « régulière » et ces mêmes lots conservés pour le projet sur la fréquence des tests sont présentées à la figure 8.

Pour l'EPN comme pour l'EPB, l'AE des graines des lots d'origine conservés dans la banque régulière du CSFB s'est maintenue proche de la valeur optimale de conservation (Figure 8). Les graines des lots conservés dans le projet sur la fréquence des tests, quant à elles, ont des valeurs d'AE supérieures aux valeurs optimales de conservation, surtout pour l'EPN (Figure 8). Aussi, pour ces deux essences, il existe une relation assez claire entre une augmentation de l'AE et celle de la TE ( $p < 0,0001$  pour les deux essences et les deux origines confondues).

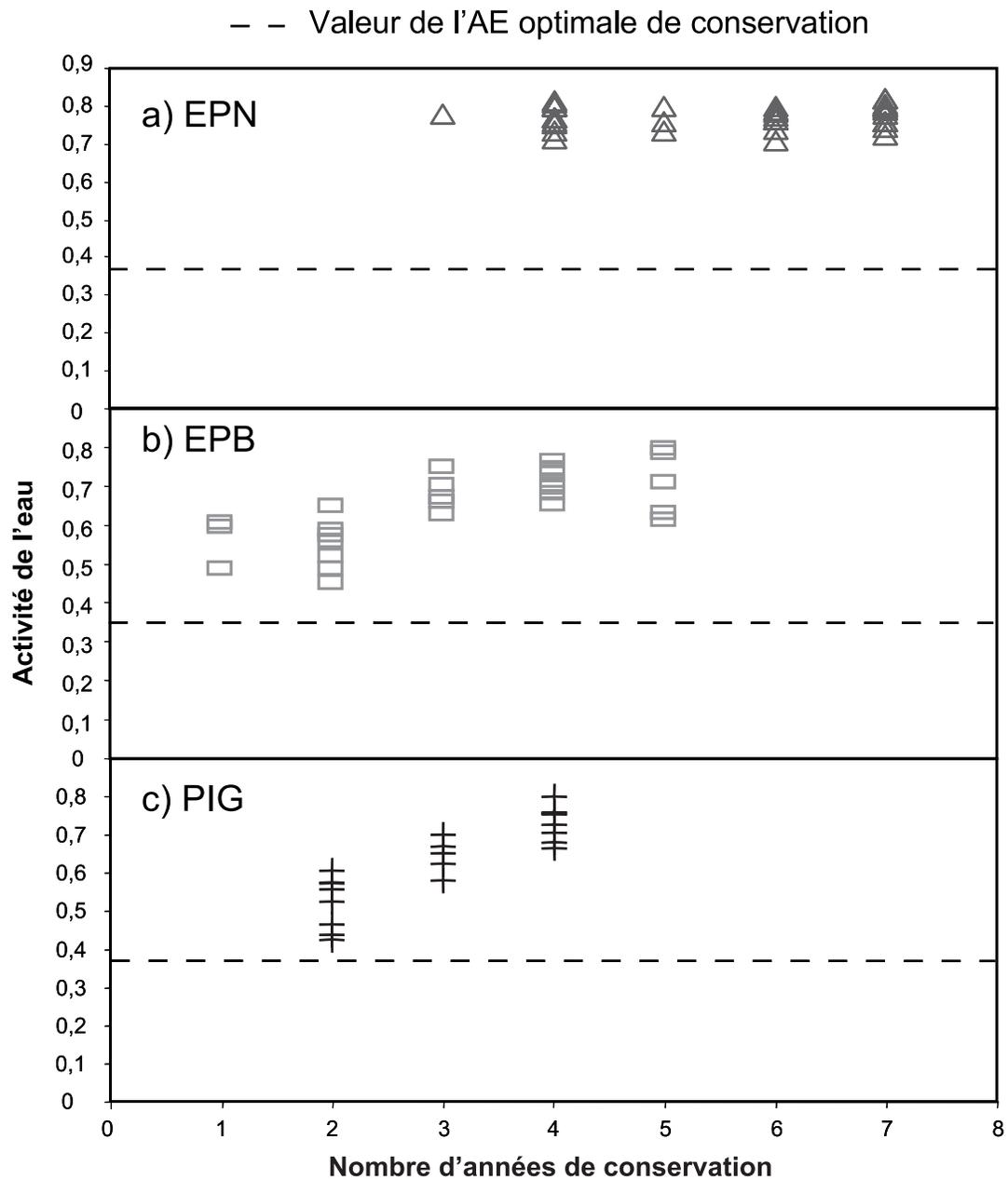


Figure 5. Activité de l'eau (AE) des lots de semences de trois essences étudiées dans le projet sur la fréquence des tests, en fonction de leur durée de conservation. L'activité de l'eau optimale de conservation (AE opti) de chaque essence est illustrée par la ligne pointillée : a) 34 lots d'épinette noire (EPN) conservés durant 3 à 7 ans, AE opti = 0,36; b) 28 lots d'épinette blanche (EPB) conservés durant 1 à 5 ans, AE opti = 0,34; c) 21 lots de pin gris (PIG) conservés durant 2 à 4 ans, AE opti = 0,36.

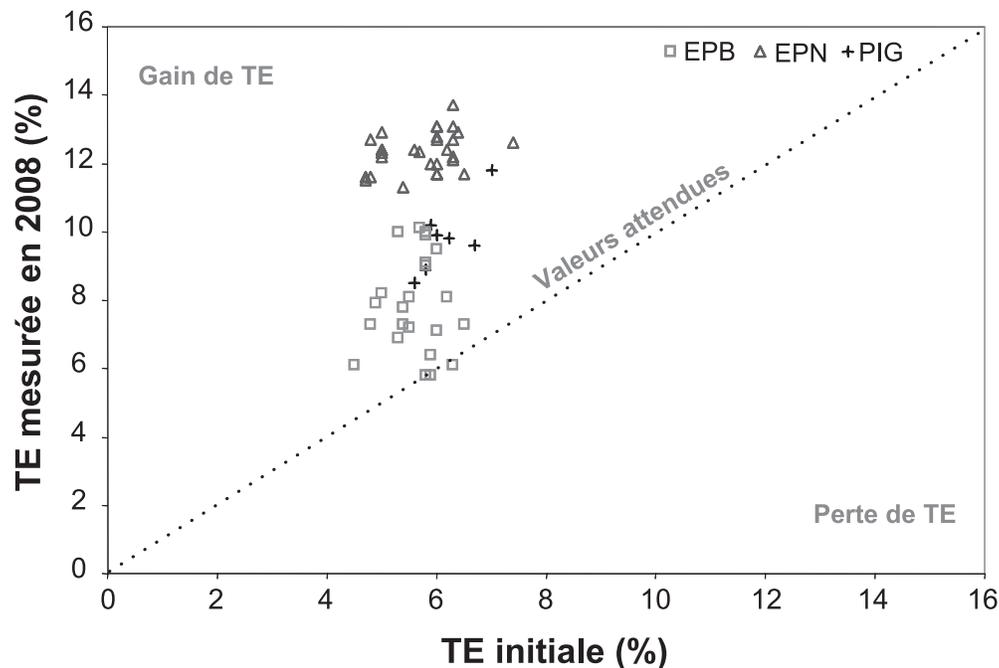


Figure 6. Teneur en eau (TE) mesurée en 2008, après ouvertures multiples des contenants, en fonction de la teneur en eau initiale (déterminée lors de l'extraction) de 28 lots d'EPN, 23 d'EPB et 6 de PIG. La ligne diagonale est celle où se retrouveraient les valeurs de TE si celles-ci étaient restées stables au cours de la conservation.

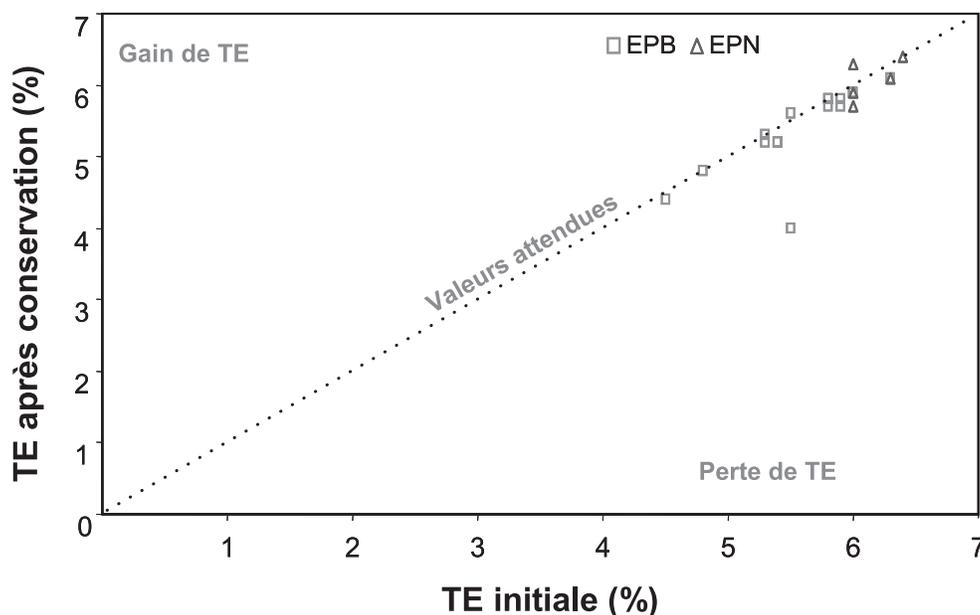


Figure 7. Teneur en eau (TE) mesurée en 2008 en fonction de la TE initiale (déterminée lors de l'extraction) de 5 lots d'EPN et 17 lots d'EPB en conservation classique dans la banque du CSFB. Les graines de l'essai fréquence sont issues de ces lots d'origine. Ces lots « mères » ont été conservés séparément, sans ouverture répétée des contenants pour y faire des prélèvements. La ligne diagonale est celle où se retrouveraient les valeurs de TE si celles-ci étaient restées stables au cours de la conservation.

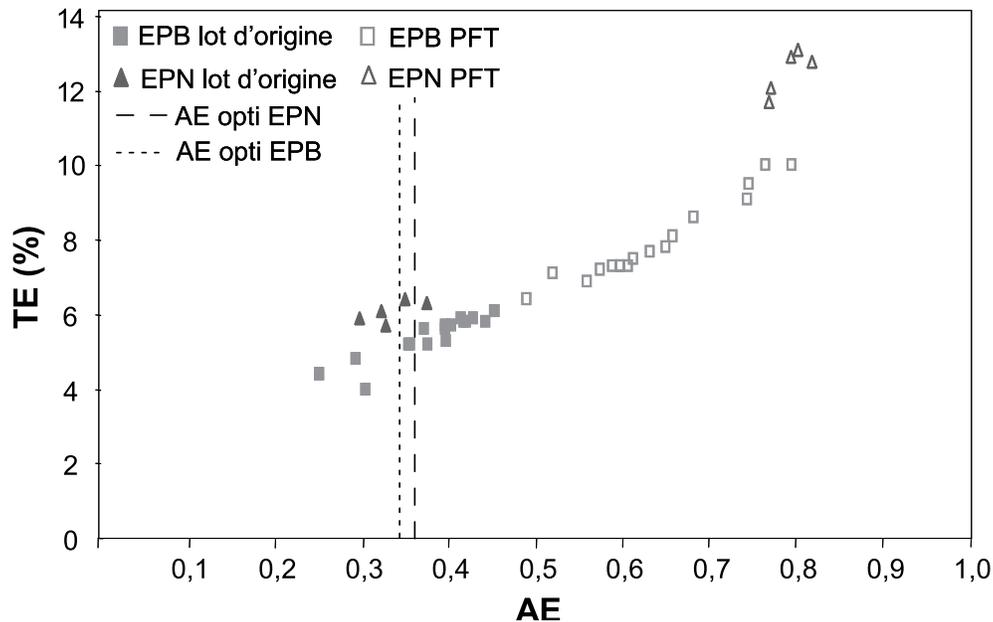


Figure 8. Évolution de la teneur en eau (TE) en fonction de l'activité de l'eau (AE), mesurées toutes deux en 2008 sur les lots de semences d'origine conservés intacts dans la banque du CSFB (5 lots d'épinette noire [EPN] et 17 lots d'épinette blanche [EPB]), et ceux du projet sur la fréquence des tests (PFT), dont les contenants ont subi des ouvertures multiples. Les lignes pointillées représentent les valeurs d'AE optimales de conservation (AE opti) pour l'EPB (0,34) et l'EPN (0,36).

### 3. Discussion

L'introduction de la mesure de l'activité de l'eau dans les tests courants de qualité au CSFB a permis de mettre en évidence une modification importante du statut hydrique des graines des lots de semences étudiés dans l'essai sur la fréquence des tests. Or, l'analyse des données de germination colligées au cours des années ne révèle aucune tendance claire quant à une vitesse de détérioration des lots. En effet, les valeurs de pourcentage de germination et de valeur germinative sont globalement stables dans le temps. On peut observer des hausses, ou des baisses, mineures mais non significatives. Des variations similaires (hausses et baisses du pourcentage de germination et de la valeur germinative) ont été observées en Colombie-Britannique pour le sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco), la pruche de l'ouest (*Tsuga heterophylla* [Raf.] Sarg.), l'épinette de Sitka (*Picea sitchensis* [Bong.] Carr.) et le cèdre rouge de l'Ouest (*Thuja plicata* Don ex D. Don) (KOLOTELO *et al.* 2001, page 50). Ainsi, avec les données actuellement disponibles, il est impossible de déterminer un intervalle de temps optimal moyen à observer entre deux tests de germination.

Le projet sur la fréquence des tests a débuté en 2000. Avant d'élaborer un protocole d'envergure, les données déjà compilées dans la banque du CSFB ont été analysées statistiquement afin d'établir des modèles permettant de prédire l'évolution de la qualité germinative des lots de semences. Ces analyses n'ont cependant pas été concluantes. En effet, la banque de données n'avait pas été conçue à cette fin, ce qui a abouti à des résultats ayant une variabilité trop importante pour tirer des conclusions fiables et opérationnelles. Le projet a donc été initié avec des lots récoltés spécifiquement pour cette étude.

Lors de sa conception en 2000, le projet prévoyait de réaliser des tests de germination sur les lots des principales essences utilisées dans le programme de reboisement du Québec durant 10 ans après leur récolte. Le projet aurait été poursuivi comme prévu si nous n'avions disposé que des données sur le pourcentage de germination. Or en 2008, à la suite des travaux de collaboration entre le Cemagref (devenu Irstea à la fin 2011) et le MRNF (BALDET *et al.* 2009), une nouvelle mesure de qualification des semences s'est ajoutée : l'activité de l'eau. Le caractère non

destructif de l'AE a permis de réaliser des mesures sur tous les lots suivis dans le cadre du projet sur la fréquence des tests. Les valeurs observées se sont révélées bien supérieures aux valeurs optimales déterminées pour chacune des essences, traduisant ainsi une modification importante du statut hydrique des lots de semences. Les mesures appariées de TE et d'AE prises en 2008 se sont également révélées bien supérieures aux valeurs attendues, qui auraient dû correspondre aux valeurs initiales lors de la mise en conservation. L'introduction de la mesure de l'AE dans les tests de contrôle de qualité a donc permis de révéler une altération significative de l'état hydrique des lots étudiés dans le projet sur la fréquence des tests. Toutefois, l'augmentation de la TE n'a pas induit de réduction appréciable de la germination et de la vigueur des lots, car les valeurs de PG et de VG sont restées assez stables pour toutes les essences.

SIMPSON *et al.* (2004) ont comparé l'effet d'une augmentation de TE à deux températures de conservation (-20 et +4 °C) pour des graines d'EPB conservées pendant 24 ans. Une TE plus élevée à +4 °C entraîne une réduction de germination, alors que la même élévation de TE à -20 °C n'a pas d'effet. Il y a donc un effet combiné de la TE et de la température sur la conservation de graines (SIMPSON *et al.* 2004). Le facteur principal du vieillissement est l'humidité dans les graines (KOLOTELO *et al.* 2001). À une température plus basse, l'effet de l'augmentation de la TE est plus faible, mais quand même présent (SIMPSON *et al.* 2008). Au CSFB, la température de conservation est de -3 °C. De plus, pour les lots de semences à l'étude, la durée de conservation opérationnelle maximale était de 7 ans, ce qui explique certainement le peu d'effet de l'augmentation de la TE sur la germination des lots.

Il a fallu déterminer si la TE des lots d'origine conservés dans la banque du CSFB avait également évolué lors de la conservation. Parmi les lots suivis dans le projet sur la fréquence des tests, certains étaient encore présents dans la banque opérationnelle du CSFB. L'AE et la TE de ces lots d'origine ont été déterminées en 2008, puis comparées aux valeurs initiales mesurées lors de leur entrée dans la banque. Il s'est avéré que la TE était restée stable, malgré les années de conservation. Le contenant utilisé dans la banque est donc suffisamment hermétique pour empêcher l'entrée d'humidité pendant plusieurs années (jusqu'à 7 ans). Alors, comment expliquer l'augmentation importante d'AE et de TE dans le projet sur la fréquence des tests ?

Les contenants utilisés pour la conservation opérationnelle des lots au CSFB ont un volume utile de 20 litres. Lorsque les lots ont été sélectionnés pour le projet sur la fréquence des tests, les semences requises pour la réalisation des tests durant les 10 années de conservation avaient été mises de côté et conservées dans un contenant de même modèle, mais de 10 litres, où la part du volume occupé par les graines conservées était comprise entre 0,4 et 6,3 %. Ainsi, des échanges entre l'air présent dans le contenant et les graines ont eu lieu. Après séchage, les graines sont très hygroscopiques, et leur état hydrique s'équilibre alors rapidement avec l'humidité de l'air qui les entoure (PROBERT 2003, Mc DONALD 2007). Les graines vont naturellement absorber ou désorber de l'humidité par diffusion en raison de la différence de potentiel hydrique existant entre la graine et son environnement immédiat (PROBERT 2003). Si l'air est plus sec que la graine, celle-ci va libérer de l'eau et donc sécher; *a contrario*, si l'air est plus humide que la graine, celle-ci va voir sa TE augmenter (PROBERT 2003). De surcroît, lors d'un prélèvement de graines, une importante condensation se crée sur les parois externes du contenant, en raison de la différence de température entre la chambre froide (-3 °C) et la salle de prélèvement (température ambiante, comprise entre 20 et 25 °C selon la saison). Cette condensation apparaît également sur les parois internes du contenant. À la longue, cette introduction d'air très humide et même, d'eau liquide qui entre en contact avec les graines, va entraîner l'augmentation de leur TE. SIMPSON *et al.* (2004) ont montré que la TE de lots d'EPB a augmenté au cours de la conservation en raison des ouvertures répétées des contenants liées au prélèvements de semences. Selon WANG (1974), lorsqu'on doit faire un prélèvement dans un contenant, il faut attendre que le contenant et les graines atteignent la température de la pièce pour éviter la condensation dans le contenant et sur les graines, sans quoi cette condensation entraînerait une augmentation de la TE. Ainsi, les graines en conservation ont besoin d'être protégées de l'humidité relative ambiante par des contenants hermétiques, ou d'être conservées dans une humidité relative contrôlée (FREIRE et MUMFORD 1986).

Il faut également tenir compte de la perméabilité intrinsèque des contenants, inhérente au polymère utilisé (polyéthylène haute densité ou PEHD, information reçue du Centre de technologie minérale et de plasturgie Inc., Thetford Mines), et des fuites d'air par le bouchon, la partie la moins hermétique d'un contenant (GÓMEZ-CAMPO 2007). Même avec

un matériau hermétique, tout effet bénéfique lié au matériau est éliminé si le contenant est ouvert régulièrement ou longtemps. Dans ce cas, ce sont les opérations courantes de gestion des lots qui nuisent à leur conservation, plutôt que le type de contenant lui-même (WALTERS *et al.* 1998). L'ouverture répétée des contenants utilisés dans le projet sur la fréquence des tests a causé une augmentation importante de TE et d'AE en raison de l'introduction, involontaire et répétée, d'humidité dans les contenants.

Au CSFB, le contenant actuellement utilisé est adéquat. L'humidité relative de la chambre froide ne peut être contrôlée puisque ceci est impossible pour des chambres ayant une température négative (dans ce cas -3 °C). Cela dit, les lots de graines qui sont actuellement conservés au CSFB sont rapidement utilisés, grâce à une bonne adéquation des récoltes avec les besoins en plants. En général, les contenants sont totalement vidés en deux ou trois années. Ce problème d'introduction d'humidité n'avait donc pas encore été mis en évidence, principalement parce que l'outil « AE » qui a permis de le révéler n'était pas encore appliqué à la gestion des semences forestières et, secondairement, en raison de la faible quantité de prélèvements partiels et répétés dans les mêmes contenants durant plusieurs années consécutives.

L'introduction d'humidité dans les contenants a modifié les conditions de conservation des lots étudiés dans le projet sur la fréquence des tests, ce qui a biaisé l'étude. Il a donc été décidé d'y mettre fin en 2008.

#### 4. Conclusion, recommandations et portée opérationnelle des résultats

La mesure de l'AE est une méthode très sensible qui a permis de détecter une modification inattendue du statut hydrique des semences étudiées dans le projet sur la fréquence des tests. Les augmentations observées de l'AE et de la TE montrent que les conditions de conservation des lots de ce projet ont été très significativement altérées. Par contraste, aucune modification significative de TE n'a été observée avec les lots d'origine conservés dans la banque régulière du CSFB. La modification de la TE des lots du projet sur la fréquence des tests aurait rendu les résultats difficilement interprétables. En effet, après 10 ans de conservation, il aurait été impossible de déterminer si une éventuelle modification de germination était due à l'épuisement « normal » des réserves des semences durant la conservation, ou plutôt à l'effet de l'augmentation de l'AE, et donc de la TE, ainsi que

du probable renouvellement régulier de l'oxygène présent. Ensemble, ces phénomènes auraient accéléré le vieillissement naturel des semences. Il a été jugé inutile d'effectuer des analyses statistiques approfondies sur l'évolution du pourcentage de germination et de la valeur germinative. En effet, il a été considéré suffisant de constater qu'aucune réduction de germination de plus de 5 % (seuil qui avait été établi lors de l'établissement du projet), n'avait été constatée, même avec une augmentation importante de la TE. À la lumière de ces résultats, il a été recommandé de mettre fin au projet sur la fréquence des tests sous sa forme actuelle, et donc, d'arrêter les tests de germination pour ce projet.

Les changements d'état hydrique des graines ont été révélés grâce à l'introduction de la mesure de l'AE dans les tests de qualité du CSFB. Ce résultat montre que l'AE est un indicateur fiable de l'évolution de l'équilibre hydrique entre les graines et le milieu de conservation, qui a permis de mettre en évidence une augmentation de la TE au cours de la conservation. Puisque l'humidité constitue un facteur de risque incompatible avec une conservation de qualité, un suivi régulier de l'AE permettrait de détecter toute évolution suspecte de l'état hydrique et donc de la TE résultante. Le caractère non destructif de la mesure de l'AE est un avantage à ce titre, puisqu'une fois la mesure effectuée, les graines peuvent être remises en conservation. L'augmentation de l'AE est attribuable à l'ouverture répétée des contenants pour y effectuer les prélèvements de semences. Dans les opérations courantes du CSFB, de tels prélèvements sont fréquents. Afin de limiter l'introduction d'air humide dans les contenants, il sera préférable d'attendre que le contenant de graines sorti de la chambre froide soit à la même température que la chambre de prélèvement avant de l'ouvrir.

Également, pour tous les lots entreposés, il faut éviter d'avoir un volume d'air dans les contenants très supérieur au volume occupé par les graines. En effet, l'air peut se charger d'humidité lors des ouvertures et reconstituer un potentiel d'oxygène propice au vieillissement. Il sera donc important d'adapter le volume du contenant à celui des graines, tout au long de la vie du lot dans la banque.

Au Québec, l'implantation du système SEMENCES permet maintenant d'effectuer des récoltes plus ciblées, et dont le volume est bien adapté à la demande anticipée de plants. Également, lors de l'allocation des semences, la priorité est maintenant donnée aux lots ayant le meilleur gain génétique sans égard à l'âge, ce qui favorise les lots les plus

jeunes. Ainsi, la durée de vie anticipée d'un lot de semences dans la banque du CSFB sera réduite, ce qui diminue encore le risque de détérioration lors de cette conservation. De plus, les améliorations constantes de la chaîne d'extraction mises en place au CSFB ont considérablement augmenté la qualité des lots entreposés. En optimisant ainsi la qualité des semences dès leur introduction dans la banque, les risques de détérioration sont réduits d'autant.

Depuis 2008, tous les lots de semences entrés dans la banque du CSFB sont qualifiés d'une valeur initiale d'AE. Aussi, jusqu'en 2014, une mesure d'AE sera prise pour les lots dont la germination doit être réévaluée à la lumière de la grille de fréquence en vigueur. La valeur obtenue sera comparée à une valeur seuil. L'AE optimale de conservation des essences orthodoxes du CSFB se situe autour de 0,35. Compte tenu de la précision des mesures et du fait que les principales activités de dégradation des composés débutent à partir d'une AE de 0,65, le seuil critique de l'AE a été fixé à 0,5. Si l'AE est supérieure à 0,5, le test de germination sera repris. Si elle est inférieure à 0,5, le résultat du test de germination présent dans le système pourrait être reconduit (un bilan sera fait en 2014 pour évaluer la pertinence de cette recommandation). De plus, pour les lots dont l'AE mesurée est supérieure à 0,5, le rééquilibrage de l'état hydrique de la totalité du lot à l'AE optimale de conservation devra être fait au moyen du sécheur à pollen/graines du CSFB.

Un projet de recherche est actuellement en cours à la DRF pour développer une stratégie québécoise de conservation à long terme des ressources génétiques forestières. Un des volets de ce projet est la mise au point d'un contenant de conservation des graines plus imperméable (polymère et bouchon), mais d'un volume réduit (60 cm<sup>3</sup>). Ce nouveau contenant, plus adapté à une conservation à long terme, préservera les semences contre l'humidité relative ambiante et les échanges indésirables de gaz. Toute avancée dans ce projet (type de polymère et système de fermeture) fera rapidement l'objet de recommandations pour améliorer les contenants de conservation utilisés au CSFB.

## 5. Remerciements

Cette étude s'est déroulée grâce à une étroite collaboration entre la DRF, la division des semences de la DGPSP et le CSFB.

La division des semences de la DGPSP a assumé les coûts de récolte des cônes et de la réalisation de tous les tests de qualité sur les semences. Nous tenons à remercier Mmes Christiane Corriveau, Lynda Généreux et M. Jean-Pierre Faust du CSFB pour la réalisation des tests de germination, d'activité de l'eau et de teneur en eau. Nous soulignons aussi la contribution de Mme Sylvie Lépine de la DGPSP pour la sélection des lots de semences utilisés dans l'étude. Nos remerciements s'adressent également aux nombreuses personnes de l'équipe de Biométrie du Service du soutien scientifique de la DRF qui ont été mises à contribution au fil des années; il s'agit de Mmes Josianne DeBlois, France Savard, Barbara Sochanski, et M. Sylvain Végiard. Nous tenons à remercier M. Mohammed S. Lamhamedi qui a agi à titre d'éditeur associé, ainsi que les deux réviseurs anonymes pour la pertinence de leurs commentaires et suggestions qui ont permis de bonifier ce manuscrit. Nos remerciements s'adressent également à M. Jean Noël pour la préparation de la carte, Mmes Sylvie Bourassa, Brigitte Boudreault et Maripierre Jalbert pour la mise en page et à Mme Denise Tousignant, pour la révision complète et l'édition de cette note de recherche forestière. Les échanges scientifiques entre la DRF et l'Irstea (anciennement Cemagref) ont été initiés dans le cadre des projets 61.702 et 62.704 de la Commission permanente de coopération franco-québécoise. Cette étude fait partie du projet de recherche 1120549-112310082 de la DRF du MRN.

## 6. Références bibliographiques

- BALDET, P., 2006. *La gestion du pollen*. Dans : CEMAGREF (éd.). *Reproduction sexuée des conifères et production de semences en vergers à graines*. Cemagref, Collection Synthèses. Paris (France). p. 287-332.
- BALDET, P. et F. COLAS, 2012. *Utiliser la mesure de l'activité de l'eau pour mieux conserver les semences forestières : une coopération fructueuse entre Irstea et la Direction de la recherche forestière au Québec*. *Revue Sciences, Eaux et Territoires*, Cahier spécial 2012 : 20-25. [<http://www.set-revue.fr/utiliser-la-mesure-de-lactivite-de-leau-pour-mieux-conserver-les-semences-forestieres-une-cooperatio>].
- BALDET, P., F. COLAS et M. BETTEZ, 2009. *Water activity - An efficient tool for seed testing*. *Tree Seed Working Group News Bulletin* 50 : 15-17. [<http://www.for.gov.bc.ca/hti/publications/tswg/TSWGNewsbulletin50.pdf>].

- BETTEZ, M. et N. BRAULT, 2004. *Le CSFB à l'heure du « Gentle »*. Des Plantes et des Hommes 7(1) : 11.
- BONNER, F.T., 1999. *Viability equations for forest tree seeds*. Seed Science and Technology 27(3) : 981-989.
- BRAULT, N., S. MERCIER et M. BETTEZ, 1996. *Traitement des graines d'arbres forestiers : 2<sup>e</sup> partie de 2*. L'Aubelle 113(37) : 1-12.
- COLAS, F., P. BALDET et M. BETTEZ, 2008. *Water activity: a new tool for moisture management of seedlots in tree seed centres*. IUFRO – CTIA 2008 Joint Conference - *Adaptation, Breeding and Conservation in the Era of Forest Tree Genomics and Environmental Change*. CTIA Tree Seed Working Group Workshop. 25 au 28 août 2008. Québec (Canada). p. 51.
- COLAS, F., P. BALDET et M. BETTEZ, 2010. *Water activity measurement: demonstration of a single and non-specific optimal storage value for orthodox forest seeds*. 29<sup>th</sup> ISTA Congress - Seed Symposium. 16 au 18 juin 2010. Cologne (Allemagne). p. 19.
- CÔME, D. et F. CORBINEAU, 2006. *Dictionnaire de la biologie des semences et des plantules*. Éditions Tec & Doc, Lavoisier Paris (France). 226 p.
- CZABATOR, F.J., 1962. *Germination value : an index combining speed and completeness of pine seed germination*. For. Sci. 8(4) : 385-396.
- ELLIS, R.H. et E.H. ROBERTS, 1980. *Improved equations for the prediction of seed longevity*. Ann. Bot. 45(1) : 13-30.
- ELLIS, R.H. et E.H. ROBERTS, 1981. *The quantification of ageing and survival in orthodox seeds*. Seed Science and Technology 9 : 373-409.
- FAO et IPGRI, 1994. *Genebanks standards*. Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation (FAO) et International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI), Rome (Italie). 13 p. [<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/meeting/015/aj680e.pdf>].
- FREIRE, M.S. et P.M. MUMFORD, 1986. *The efficiency of a range of containers in maintaining seed viability during storage*. Seed Sci. Technol. 14 : 371-381.
- GÓMEZ-CAMPO, C., 2007. *A guide to efficient long term seed preservation*. Monographs ETSIA, Univ. Politécnica de Madrid 170 : 1-17. [[http://www.seedcontainers.net/a\\_guide\\_to\\_long-term\\_seed\\_preservation.html](http://www.seedcontainers.net/a_guide_to_long-term_seed_preservation.html)].
- IDLIMAM, A., A. LAMHARRAR, N. ABDENOURI, S. AKKAD, C.S. ETHMANE KANE, A. JAMALI et M. KOUHILA, 2008. *Thermodynamic properties and moisture sorption isotherms of Argania spinosa and Zygophyllum gaetulum*. J. Agron. 7(1) : 1-14.
- ISTA, 2009. *Règles Internationales pour les Essais de Semences 2009*. Bassersdorf (Suisse).
- KOLOTELO, D., E. VAN STEENIS, M. PETERSON, R. BENNETT, D. TROTTER et J. DENNIS, 2001. *Seed Handling Guidebook*. British Columbia Ministry of Forests, Tree Improvement Branch, 106 p. [[http://www.for.gov.bc.ca/hti/publications/misc/seed\\_handling\\_guidebook\\_hi.pdf](http://www.for.gov.bc.ca/hti/publications/misc/seed_handling_guidebook_hi.pdf)].
- LABUZA, T.P., L. McNALLY, D. GALLAGHER, J. HAWKES et F. HURTADO, 1972. *Stability of intermediate moisture foods. 1. Lipid Oxidation*. J. Food Sci. 37(1) : 154-159.
- Mc DONALD, M.B., 2007. *Seed moisture and the equilibrium seed moisture content curve*. Seed Technol. 29(1) : 7-18.
- PROBERT, R.J., 2003. *Chapter 19. Seed viability under ambient conditions, and the importance of drying*. Dans : SMITH, R.D., J.B. DICKIE, S.H. LININGTON, H.W. PRITCHARD et R.J. PROBERT (éd). *Seed conservation turning science into practice*. The Royal Botanic Gardens, Kew, Sussex (UK). p. 369-387. [[http://www.kew.org/ucm/groups/public/documents/document/ppcont\\_013781.pdf](http://www.kew.org/ucm/groups/public/documents/document/ppcont_013781.pdf)].
- RAO, N.K., J. HANSON, M.E. DULLOO, K. GHOSH, D. NOWELL et M. LARINDE, 2006. *Manual of Seed Handling in Genebanks. Handbooks for Genebanks No. 8*. Bioversity International, Rome (Italie). 147 p. [[http://www.bioversityinternational.org/fileadmin/bioversity/publications/pdfs/1167\\_Manual\\_of\\_Seed\\_Handling\\_in\\_Genebanks.pdf?cache=1352749893](http://www.bioversityinternational.org/fileadmin/bioversity/publications/pdfs/1167_Manual_of_Seed_Handling_in_Genebanks.pdf?cache=1352749893)].
- ROBERTS, E.H. et R.H. ELLIS, 1977. *Prediction of seed longevity at sub-zero temperatures and genetic resources conservation*. Nature 268(5619) : 431-433.

- ROBERTS, E.H. et R.H. ELLIS, 1989. *Water and seed survival*. Ann. Bot. 63(1) : 39-52.
- SAS INSTITUTE INC., 2009. *SAS/STAT ® 9.2. User's Guide, Second Edition*. Cary, NC : SAS Institute Inc.
- SAUCIER, J.-P., J.-F. BERGERON, P. GRONDIN et A. ROBITAILLE, 2001. *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec*. Carte couleur. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune. [<http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-zones-carte.jsp>].
- SCOTT, W.J., 1953. *Water relations of Staphylococcus aureus at 30°C*. Aust. J. Biol. Sci. 6 : 549-564.
- SIMPSON, D.J., B. DAIGLE et D. HAYES, 2008. *Impact of storage viability of white spruce seed*. Tree Planters' Notes 52(2) : 4-8. [<http://www.rngr.net/publications/tpn/52-2/impact-of-storage-on-viability-of-white-spruce-seed>].
- SIMPSON, J.D., B.S.P. WANG et B.I. DAIGLE, 2004. *Long-term seed storage of various Canadian hardwoods and conifers*. Seed Sci. Technol. 32 : 561-572.
- SUN, W.Q., 2002. *Methods for the study of water relations under desiccation stress*. Dans : BLACK, M. et H.W. PRITCHARD (éd.). *Desiccation and survival in plants. Drying without dying*. CABI Publishing, New-York (USA). p. 47-91.
- VERTUCCI, C.W. et E. ROOS, 1990. *Theoretical basis of protocols for seed storage*. Plant Physiol. 94 : 1019-1023.
- WALTERS, C., K.N. RAO et X. HU, 1998. *Optimizing seed water content to improve longevity in ex situ genebanks*. Seed Sci. Res. 8(Suppl. 1) : 15-22.
- WANG, B.S.P., 1974. *Tree seed storage*. Canadian Forestry Service, Department of the Environment. Ottawa, Ont. Fo47-1335. 32 p. [[http://cfs.nrcan.gc.ca/bookstore\\_pdfs/31917.pdf](http://cfs.nrcan.gc.ca/bookstore_pdfs/31917.pdf)].
- WANG, B.S.P., P.J. CHAREST et B. DOWNIE, 1994. *Conservation ex situ de pollen et de graines, et de culture in vitro de plantes ligneuses pérennes*. Service canadien des forêts et Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) (éd.), Rome (Italie). Études FAO Forêts 113, 94 p. [<http://www.fao.org/docrep/016/ap425f/ap425f00.pdf>].
- WEST, B.T., K.B. WELCH et A.T. GALECKI, 2007. *Linear mixed models, a practical guide using statistical software*. Chapman and Hall / CRC Press. 353 p.





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.

**Ressources  
naturelles**

**Québec** 

ISBN : 978-2-550-66545-8  
ISBN (pdf) : 978-2-550-66546-5  
Dépôt légal 2012  
Bibliothèque nationale du Québec  
© 2012 Gouvernement du Québec