



NAPPO

North American Plant Protection Organization
Organización Norteamericana de Protección a las Plantas

Documents de science et technologies de l'ONAPP
ST 05 : Examen du traitement à la chaleur du bois et de l'emballage en bois

Préparé par les membres du
Comité sur les forêts de l'ONAPP¹

¹ Auteur principal : M. Eric Allen, Ph.D, chercheur scientifique, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts
Mars 2014

Table des matières

	Page
Sommaire	3
1. Aperçu de l'historique du traitement du bois par la chaleur	3
2. Revue de la littérature – Tolérance à la température des organismes nuisibles vivant dans le bois	6
2.1 Thermotolérance	6
2.2 Champignons	7
2.3 Insectes	8
2.4 Nématode du pin	10
2.5 Bactéries	10
3. Protocoles d'essai de traitement	10
4. Comment les organismes réagissent-ils au traitement par la chaleur; mortalité – physiologie de survie	12
Tableau 1: Réponse des insectes nuisibles s'attaquant aux produits entreposés à la température	12
5. Variabilité dans la thermotolérance des stades de vie	13
5.1 Insectes	13
5.2 Champignons et oomycètes	13
5.3 Nématodes du pin	14
6. Méthode pour chauffer le bois	14
6.1 Types d'enceinte de traitement par la chaleur et séchoirs à bois	14
6.2 Température et humidité	16
6.3 Problèmes et difficultés concernant le traitement par la chaleur du bois	16
6.4 Modèles de pénétration thermique – gradients de température	18
Appendix 1: Exemples d'exigences relatives à l'importation de traitements par la chaleur provenant de multiples pays	21
Appendix 2: Exemples de mycètes thermophiles vivant dans le bois	22
Appendix 3: Champignons Basidiomycètes qui produisent des chlamydospores	23
Références	26

Sommaire

Le traitement par la chaleur est une méthode efficace pour tuer les organismes nuisibles réglementés qui affectent les arbres forestiers pouvant être associé à des produits de bois résultants. Le présent document passe en revue l'historique de la chaleur comme méthode de traitement du bois, le fondement scientifique expliquant son effet sur les organismes nuisibles affectant le bois (y compris les insectes, les champignons, les nématodes et les bactéries), les processus industriels qui servent à traiter le bois par la chaleur et la façon dont le traitement par la chaleur peut être intégré dans l'approche systémique phytosanitaire. Ce document a pour objectif d'encadrer les organisations nationales de protection des végétaux en ce qui a trait à l'utilisation du traitement par la chaleur prévue dans les règlements phytosanitaires.

1. Aperçu de l'historique du traitement du bois par la chaleur

Depuis longtemps, on utilise la chaleur pour réduire le degré d'humidité du bois et tuer les organismes nuisibles (insectes, champignons, nématodes) vivant dans les produits de bois ou sur ceux-ci. La recherche publiée dans les années 1920 et 1930 a consigné la première documentation sur la chaleur comme traitement pour tuer les insectes (Craighead 1920, Snyder 1921) et les champignons (Chidester 1937, Snell 1922, 1923, Montgomery 1936) présents dans le bois. L'utilisation de la chaleur comme méthode pour lutter contre les organismes nuisibles dans les grains, les fruits et autres produits agricoles est aussi bien documentée (Hansen et Johnson 2007, Hansen et coll. 2011). La majorité des premières recherches sur les traitements du bois porte sur les pertes de qualité et la réduction de la valeur du produit pour les marchés nationaux, mais le traitement par la chaleur à des fins de quarantaine a été mentionné par Snyder (1921):

« Des dommages de ce type [infestation du lycte brun – *Lyctus*] se retrouvent à grande échelle partout dans le monde, puisque de nombreuses espèces de ces dendroctones sont transportées d'un pays à l'autre dans les produits commerciaux qu'ils infestent. »

Les exigences en matière de quarantaine pour les produits de bois transportés à l'échelle internationale au cours de la première moitié du 20^e siècle ont grandement varié. Certains pays importateurs ne comptaient pratiquement aucune exigence, et d'autres, une combinaison d'exigences voulant que les produits soient exempts d'écorce, d'organismes nuisibles spécifiés et de terre.

Dans les années 1980, les préoccupations de l'Europe au sujet du risque d'introduction du nématode du pin (*Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhner) Nickle) en provenance de la répartition de ses populations indigènes en Amérique du Nord ont mené à la recherche conjointe entre l'Union européenne (UE) et l'Amérique du Nord sur les protocoles de traitement par la chaleur pour tuer le nématode et son insecte vecteur (Smith et coll. 1991). Les études ont indiqué qu'une température de 52,1 °C et plus permettait de tuer tous les nématodes du pin présents dans le bois. À la suite de l'analyse statistique visant à déterminer la température nécessaire pour atteindre un taux d'élimination de 100 % à des taux de fiabilité de 99,994 % et de confiance de 95 %, le rapport final a recommandé le traitement du bois à une température centrale de 56 °C pendant 30 minutes (Smith et coll. 1991). Cette recommandation de temps et de température a été intégrée dans la réglementation de l'UE sur l'importation de produits de bois provenant de secteurs infestés par le nématode du pin (Commission européenne, 1992).

D'autres normes concernant le traitement du bois par la chaleur ont été prescrites dans la réglementation des États-Unis. Au début des années 1990, le Service des forêts des États-Unis a examiné les traitements des billes et autres produits de bois (USDA APHIS 1991), car

le déplacement des produits de bois partout dans le monde représentait un risque considérable d'importer des organismes nuisibles forestiers exotiques (USDA Forest Service 1991, 1992, 1993). Une proposition de règle dans le registre fédéral a été publiée en 1994 et décrivait un bon nombre de traitements, y compris le traitement par la chaleur (USDA 1994) :

« Les procédures de traitement par la chaleur peuvent utiliser la vapeur, l'eau chaude, les séchoirs et l'exposition à l'énergie micro-onde ou tout autre méthode qui élève la température du centre de chaque article réglementé traité à un minimum de 56 °C et maintient cette température centrale pendant au moins 30 minutes ».

Après avoir reçu les commentaires du public, on a modifié la règle finale, particulièrement en ce qui concerne l'exigence liée au traitement par la chaleur :

« Changement de la norme concernant le traitement par la chaleur et le traitement par la chaleur avec réduction du degré d'humidité de 56 °C pendant 30 minutes à 71,1 °C pendant 75 minutes. Ce changement fait suite à plusieurs commentaires qui recommandaient que l'Animal and Plant Health Inspection Service (APHIS) utilise une température de 71,1 °C pendant 75 minutes comme l'a indiqué l'examen réalisé par un groupe de scientifiques du Service des forêts le 10 janvier 1992 – Proposed Test Shipment Protocol for Importing Siberian Larch Logs (projet de protocole d'essai sur les envois pour l'importation de rondins de mélèzes de Sibérie). Après avoir examiné cette recherche et nos données provenant de la proposition soutenant une combinaison de température et de temps inférieure, nous croyons que nous avons tort de penser que le traitement par la chaleur proposé éliminerait efficacement tous les organismes nuisibles préoccupants. Plus précisément, un traitement par la chaleur à une température de 56 °C pendant 30 minutes pourrait permettre à divers champignons nocifs de survivre. Les rapports de recherche indiquent que plusieurs champignons dans le bois peuvent survivre pendant une à plusieurs heures au traitement par la chaleur à des températures allant de 56 °C à 70 °C, mais sont détruits par un traitement à 71,1 °C pendant 75 minutes. Le traitement par la chaleur exigé par la réglementation doit permettre de détruire efficacement tous les champignons potentiellement dangereux. »

D'autres pays ont mis au point différentes normes de traitement par la chaleur pour les produits de bois. Par exemple, la réglementation de la Nouvelle-Zélande précise ce qui suit :

« Le traitement par la chaleur (ou séchage au séchoir) à une température centrale continue minimum de 70 °C pendant plus de 4 heures » pour le bois scié d'une épaisseur maximum de 300 mm (NZ MPI 2013). »

Les exigences en matière d'importation de l'Australie varient selon l'espèce de bois et le pays d'origine précisant des protocoles de traitement différents (DAFF 2013). Par exemple, les traitements approuvés pour le *Fraxinus* L. ou *Quercus* L. provenant de tous les pays comprennent le traitement par la chaleur sèche (traitement autorisé par l'Australie –T10025) à 74 °C pendant au moins 60 minutes une fois que la température centrale a été atteinte, ou une option de séchage au séchoir (T9912) qui précise une température d'enceinte de 74 °C et différentes durées de traitement (de 4 à 18 heures), selon l'épaisseur du bois. La durée de traitement ne commence pas tant que la température et l'humidité de l'enceinte ne sont pas stables et que la température centrale du bois a atteint au moins 74 °C. En revanche, le bois importé du Canada en Australie (autre que le *Fraxinus* ou *Quercus*) peut être traité par la chaleur sous la surveillance du gouvernement (T9968) : à une température de 56 °C pendant 30 minutes, mesurée au centre du bois, ou l'option de séchoir (T9912) décrite précédemment.

Tout au long des années 1990, l'emballage en bois (palettes, caisses, bois de calage, etc.) a été de plus en plus ciblé comme importante voie d'entrée d'organismes nuisibles forestiers exotiques (USDA 2000, Allen et Humble 2001). Par exemple, on estime que les introductions du grand hylésine des pins, *Tomicus piniperda* L. et du longicorne asiatique, *Anoplophora glabripennis* Motschulsky, en Amérique du Nord se sont produites par la voie de bois de caisse ou de bois de calage infesté transporté par navire (Liebhold et coll. 1995). La découverte d'une population établie de *A. glabripennis* aux États-Unis en 1996 et ailleurs dans le monde au cours des années suivantes (Haack et coll. 2010) a motivé certains pays à adopter une réglementation sur l'importation afin de lutter contre les risques présentés par les organismes nuisibles particulièrement associés à l'emballage en bois. Différents pays ont pris diverses approches phytosanitaires requérant des mesures ou des combinaisons de mesures, p. ex., le traitement par la chaleur (précisant parfois les paramètres de traitement comme une température centrale de 56 °C pendant 30 minutes, faisant parfois référence à des horaires de séchage), l'absence d'écorce et de trous de larves, le séchage au séchoir à un degré d'humidité précis, généralement 20 %, les certificats phytosanitaires obligatoires. Afin d'harmoniser les exigences phytosanitaires à l'échelle internationale en ce qui concerne l'emballage en bois, on a entrepris l'élaboration d'une norme qui comprendrait les traitements reconnus mondialement. Une norme régionale rédigée et adoptée par l'Organisation nord-américaine pour la protection des plantes (ONAPP) (NRMP11) en 2001 a servi de point de départ pour l'élaboration de la NIMP 15, « Directive pour la réglementation de matériaux d'emballage à base de bois dans le commerce international », adoptée par la Commission des mesures phytosanitaires de la Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV) en 2002. Aucun traitement par la chaleur spécifique n'a été décrit dans les normes régionales pour les mesures phytosanitaires 11 (NRMP11). La norme a plutôt recommandé ce qui suit :

« Le bois doit être séché en le chauffant dans un séchoir à une durée et une température spécifique, comme il est recommandé dans un manuel d'utilisation reconnu des séchoirs. »

D'autres directives plus normatives sur le traitement par la chaleur ont été incluses dans la version originale adoptée de la NIMP 15:2002. Le groupe de rédaction a évalué les renseignements scientifiques disponibles et a précisé ce qui suit :

« Le matériel d'emballage en bois doit être chauffé à une température et pendant un délai spécifiques pour que le bois atteigne une température centrale minimale de 56 °C pendant au moins 30 minutes. Le séchage par séchoir, l'imprégnation chimique sous pression ou autres traitements peuvent être considérés comme des traitements par la chaleur dans la mesure où ils respectent les spécifications qui y sont associées. Par exemple, l'imprégnation chimique sous pression peut respecter la spécification liée au traitement par la chaleur au moyen de la vapeur, de l'eau chaude ou de la chaleur sèche » (NIMP 15 : 2002).

Le texte révisé a été adopté par la Commission des mesures phytosanitaires en 2009. Celui-ci reconnaissait différentes méthodes de traitement par la chaleur et présentait des directives pratiques sur l'application.

« Divers processus ou sources d'énergie peuvent convenir pour mettre en œuvre les paramètres de traitement requis. Par exemple, le chauffage conventionnel à vapeur, le séchage par séchoir, l'imprégnation chimique sous pression par la chaleur et le

chauffage diélectrique (hyperfréquence, radiofréquence) peuvent tous être considérés comme des traitements par la chaleur à condition qu'ils respectent les paramètres du traitement par la chaleur précisés dans cette norme » (NIMP : 2009).

2. Revue de la littérature – Tolérance à la température des organismes nuisibles vivant dans le bois

2.1 Thermotolérance

Les organismes vivant dans le bois sont tués à différentes températures, et certains démontrent divers niveaux de thermotolérance. Cette notion a été reconnue dans la formulation de l'objectif de la NIMP 15:2009 comme il est décrit dans le champ d'application des deux textes révisés de 2002 et de 2009 qui suit:

« Réduire le risque d'introduction ou de propagation des organismes nuisibles ravageurs associés au matériel d'emballage en bois »

en mettant en application les traitements mondialement acceptés qui lutteraient contre les organismes nuisibles. La version 2002 de la norme reconnaît la possibilité que certains organismes nuisibles survivent aux traitements approuvés.

« Les mesures approuvées devraient être acceptées par toutes les organisations nationales de la protection des végétaux (ONPV) pour autoriser l'entrée de matériaux d'emballage en bois sans exigences spécifiques supplémentaires sauf lorsqu'il est déterminé lors d'interceptions ou d'analyse du risque phytosanitaire (ARP) que les organismes de quarantaine spécifiés associés à certains types de matériaux d'emballage en bois provenant de sources spécifiques nécessitent des mesures plus rigoureuses. »

Cette formulation a été légèrement révisée en 2009 :

« Ces mesures phytosanitaires devraient être acceptées par ONPV pour autoriser l'entrée de matériaux d'emballage en bois sans exigences spécifiques supplémentaires. » Les mesures phytosanitaires exigées allant au-delà d'une mesure approuvée telle que décrite dans la présente norme nécessitent une justification technique.

La note en bas de page à l'annexe 1 de la version de 2002 de la norme mentionnait aussi la thermotolérance possible, mais ce texte a été retiré en 2009.

« Une température centrale minimale de 56 °C pendant au moins 30 minutes est choisie en tenant compte de la grande variété d'organismes nuisibles pour qui cette combinaison a été prouvée comme létale et du fait qu'il s'agit d'un traitement réalisable sur le plan commercial. Même s'il est reconnu que certains organismes nuisibles ont une thermotolérance supérieure, les organismes de quarantaines dans cette catégorie sont pris en charge par les ONPV au cas par cas. »

Quelques éléments de la variabilité dans les résultats expérimentaux rapportés dans les sections suivantes représentent différentes approches expérimentales. Comme il est indiqué dans la section 3, il est essentiel que les méthodes normalisées soient utilisées dans les essais de traitement.

2.2 Champignons

Même si la plupart des champignons poussent de manière optimale à des températures de 0 à 40 °C (Seifert 1993), les températures rapportées nécessaires pour tuer différentes espèces de champignons varient considérablement. Par exemple, Lindgren (1942) a testé 11 isolats de champignons de bleuissement qui ont interrompu leur croissance à des températures de 29 à 39 °C. La plupart des champignons colorants peuvent tolérer des températures assez élevées et cesseront de pousser à des températures de 40 à 50 °C dans des conditions d'humidité élevée (Seifert 1993). Dans une évaluation de 64 espèces de champignons pourrissant le bois, Humphreys et Siggers (1934) ont démontré que 62 des cultures ont arrêté de pousser à 46 °C. Certaines espèces, connues sous le nom de mycètes thermophiles, peuvent tolérer des températures supérieures à 50 °C et pousser (annexe 2). Jones (1973) a démontré que le champignon causant le flétrissement du chêne (*Ceratocystis fagacearum* (Bretz) Hunt) a été éliminé lorsque les billes ont été traitées pendant 6 heures à plus de 54 °C ou plus longtemps à des températures moins élevées. Kappenburg (1998) a indiqué que la température létale du *C. fagacearum* était de 68 °C dans une humidité élevée (1998). Jaynes et DePalma (1984) a indiqué que la croissance des champignons et la germination conidiale de l'*Endothia parasitica* étaient affectées par une exposition à 50 °C ou plus pendant 30 minutes. Le mycélium était généralement tué à 53 °C ou plus, mais certaines spores survivaient à 60 °C. Chidester (1937) a indiqué qu'il fallait des durées de traitement de 75 minutes à 66 °C ou 30 minutes à 77 °C pour tuer trois champignons causant la pourriture. (*Lenzites sepiaria* Fr., *Poria incrassata* (Berk. & M.A. Curtis) Burt et *Lentinus lepideus* (Fr.) Fr.). Dans une étude plus récente, Newbill et Morrell (1991) ont déterminé que tous les champignons à l'essai (*Peniophora* spp., *Stereum sanguinolentum* (Alb. & Schwein.) Fr., *Postia placenta* (Fr.) M.J. Larsen & Lombard, et *Antrodia carbonica* (Overh.) Ryvarden & Gilb.) ont été éliminés après 75 minutes à 66 °C. Uzunovic et Khadempour (2007) ont testé des champignons de bleuissement et des champignons pourrissant l'aubier dans le bois naturellement infesté et artificiellement contaminé (*Ophiostoma clavigerum* (Robinson-Jeffrey & Davidson) Harrington, *O. montium* (Rumbold) Arx, *Leptographium longiclavatum* S.W. Lee, J.J. Kim & C. Breuil, et *L. terebrantis* S.J. Barras & T.J. Perry, *Ambrosiella* spp. Arx et Hennebert, *Trichaptum abietinum* (Dicks.) Ryvarden et *Phellinus chrysoloma* (Fr.) Donk). Ils ont indiqué que tous les champignons présents dans le bois naturellement infesté avaient été tués à une température de 56 °C ou moins pendant 30 minutes, mais que certains isolats fongiques dans le bois artificiellement contaminé devaient être traités à 61 °C ou une exposition de 60 minutes pour être tués. À l'aide des méthodes expérimentales semblables, Allen (non publié) a mis à l'essai une variété de champignons : *Phellinus noxius* (Corner) G.H. Cunn., *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref., *Armillaria ostoyae* (Romagn.) Herink, *Gloeophyllum sepiarium* (Wulfen) P. Karst., *Gloeophyllum striatum* (Sw.) Murrill, *Ceratocystis fagacearum* (Bretz) Hunt, *Ophiostoma wagneri* (Goheen & F.W. Cobb) T.C. Harr., *Ceratocystis polonica* (Siemaszko) C. Moreau, *Leptographium wingfieldii* M. Morelet. Toutes les espèces de champignons mises à l'essai ont été tuées à des températures de 56 °C ou moins pendant 30 (sauf le *G. sepiarium* (Wulfen) P. Karst., une espèce thermotolérante (Chidester 1939, Kurpik et Wasney 1978) qui a survécu à une température de 71 °C. Ramsfield et coll. (2010) tested *Cladosporium herbarum* (Pers.) Link, *Cladosporium tenuissimum* Cooke, *Fusarium circinatum* Nirenberg & O'Donnell, *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griffon & Maubl., *Neonectria fuckeliana* (C. Booth) Castl. & Rossman, *Ophiostoma novo-ulmi* Brasier, *Sphaeropsis sapinea* (Fr.) Dyko & B. Sutton, *Armillaria novae-zelandiae* (G. Stev.) Boesew., *Phlebiopsis gigantea* (Fr.) Jülich et *Schizophyllum commune* Fr., *Phytophthora cinnamomi* Rands à des températures variant de 41 à 71 °C et a déterminé que les isolats de certains champignons survivaient à 56 °C pendant 30 minutes. Lorsqu'ils adaptaient selon les modèles statistiques, ils prévoyaient qu'une

exposition pendant 30 minutes à une température minimum de 61,7 °C ou 69,6 °C serait nécessaire pour éliminer 99 ou 99,99 % de tous les isolats de champignons testés.

Il a été observé que les champignons vivant dans l'aubier étaient plus sensibles à la température que les champignons dans le bois de cœur qui produisent des structures spéciales comme des chlamydospores (Newbill et Morrell 1991) ou arthrospores (Schmidt 2006), ce qui facilite leur survie dans des conditions défavorables (annexe 3).

2.3 Insectes

Le chauffage du bois à 56 °C pendant 30 minutes tuera la plupart des stades de vie des insectes. Une première étude par Graham (1924) a déterminé que les larves et les adultes de l'*Ips pini* Say étaient tués à 49 et 50 °C respectivement, et que le *Chrysobothris dentipes* Germar devait être traité pendant une durée indéterminée à 52 °C. Le traitement par la chaleur pendant 1 h 50 était fatal pour les larves, les nymphes et les jeunes adultes de l'*Ips typographus* (Annala 1969). Des effets semblables ont été observés dans un environnement forestier où les insectes sur les côtés des billes exposés au soleil étaient tués tandis que ceux sur les côtés ombragés survivaient. Mayfield et coll. (2014) ont testé le traitement par la chaleur contre le *Pityophthorus juglandis* Blackman et un pathogène fongique associé au *Geosmithia morbida* M. Kolarůk, E. Freeland, C. Utley, et N. Tisserat ont recommandé une température de 56 °C pendant 40 minutes (mesure sur un cm d'aubier) pour tuer les deux organismes. Il a été démontré que les traitements par la chaleur avec des températures de séchoir de 60 à 71 °C pendant 1 heure tuaient la larve du *Monochamus* présente dans le bois d'œuvre (Ostaff et Cech 1978). Ce plan de traitement a été précisé à 56 °C pendant 30 minutes pour le traitement du bois infesté de nématodes du pin, et la combinaison a été acceptée comme norme phytosanitaire contre les insectes et les nématodes (Smith 1991). Mushrow et coll. (2004) ont déterminé que les larves, les nymphes et les adultes du *Tetropium fuscum* (Fabr.) vivant dans le bois étaient éliminés par un traitement à une température de moins de 50 °C pendant 30 minutes. L'*Anobium punctatum* De Geer aux stades d'œufs, de larves et d'adultes a fait l'objet des tests de Hansen et Jensen (1996). Les larves étaient tuées à 100 % grâce à une exposition de 5 minutes à une température de 52 °C; les insectes aux stades d'œufs et d'adultes étaient plus sensibles au traitement par la chaleur. Meyers et Bailey (2011) ont traité par la chaleur le bois rond naturellement infesté par la larve de l'*Anoplophora glabripennis*. Aucune larve n'a survécu à un traitement de 50 °C pendant 30 minutes. Certains insectes, comme le lycte brun (*Lyctus* spp.), seraient plus tolérants à la température, ce qui obligerait à les traiter pendant 30 minutes à 82 °C (Snyder 1923).

Certaines recherches démontrent la survie de l'*Agrilus planipennis* Fairmaire à certains stades de vie lorsqu'il est traité à une température de 56 °C pendant 30 minutes. McCullough et coll. (2007) ont indiqué que la prénymphe *A. planipennis* survivait dans les copeaux de bois (6,5 x 3,1 x 1,5 cm) traités à 60 °C pendant 20 minutes, mais pas pendant 120 minutes. À 55 °C, 17 % des prénymphe survivait, mais aucune ne résistait à une exposition à 60 °C pendant 120 minutes, quoiqu'aucune nymphose de prénymphe ayant survécu n'avait lieu dans des copeaux exposés à une température de 55 à 60 °C. Cette étude surveillait la température d'enceinte. Myers et coll. (2009) ont évalué la survie de la larve et de la prénymphe de l'*A. planipennis* dans le bois de chauffage. Des sondes de contrôle de la température ont été insérées à 3,5 cm (profondeur de pénétration maximum du dendroctone). Les larves étaient capables de survivre à une combinaison de température de 60 °C et d'une durée de 30 minutes dans le bois, les prénymphe survivait à 55 °C pendant 30 minutes, 50 °C pour 30 minutes et à 60 °C pendant 15 minutes. L'émergence des adultes a été observée dans le bois de chauffage à des traitements à 45, 50 et 55 °C à des intervalles de temps de 30 et

60 minutes. Toutefois, aucune émergence ne s'est produite lors des traitements à 60 ou 65 °C. Nzokou et coll. (2008) ont observé que l'adulte de l'*A. planipennis* émergeait dans les billes à 60 °C pendant 30 minutes, mais pas à 65 °C. C. Goebel et coll. (2010) ont signalé l'émergence d'adultes dans le bois de chauffage traité à des températures d'enceinte proches de 56 °C dans un petit séchoir à bois. Haack et Petrice (2010) ont testé la survie de l'*A. planipennis* (ainsi que de l'hylésine variable, du dendroctone du pin et du charançon du pin) dans une enceinte à 56 °C pendant diverses durées, mesurant la température au centre et à 1 cm sous la surface. Aucune émergence d'espèces testées n'a été observée dans les billes traitées à une température centrale de 56 °C. C. Sobek et coll. (2011) a testé la survie de l'*A. planipennis* dans des billes de bois dans une chambre opérationnelle de traitement par la chaleur. Ils ont indiqué une mortalité totale des insectes aux stades larvaires à 56 °C pendant 30 minutes. De même, toutes les nymphes ont été éliminées à des expositions aussi brèves que 10 minutes à 54 °C. Ils ont également examiné les mécanismes de thermotolérance de l'agrile du frêne. Des protéines de choc thermique ont été produites lorsque les larves ont été lentement réchauffées passant d'une température ambiante à la température de traitement; ces larves avaient une thermotolérance supérieure. Ils ont proposé que ce mécanisme puisse leur permettre de survivre au-delà de la température de 56 °C testée en laboratoire pendant 30 minutes. Toutefois, ils ont soutenu que des plans de traitement par la chaleur utilisés dans les conditions opérationnelles des installations canadiennes de traitement par la chaleur surpassent largement la norme NIMP15:2009 et que même une extrême plasticité thermique ne permettra probablement pas aux insectes nuisibles de survivre au processus de traitement par la chaleur. Ils ont également considéré que l'effet sublétal du traitement qui pourrait causer une réduction de la fécondité ou de la stérilité pourrait augmenter la marge de sécurité des traitements par la chaleur actuels (Sobek et coll. 2011 citant Scott et coll. 1997, Huang et coll. 2007, and Mironidis et Savopoulou-Soultani 2010).

2.3.1 Évaluation du traitement par la chaleur par le groupe de recherche international sur les organismes de quarantaine forestiers afin de gérer les risques phytosanitaires de l'*A. planipennis*

Le groupe de recherche international sur les organismes de quarantaine a passé en revue la littérature publiée sur la tolérance de l'*A. planipennis* aux paramètres de traitement par la chaleur prescrits dans la NIMP15:2009 à IFQRG-8 (2010). Les études ont été réalisées sur du bois de chauffage et des copeaux de bois présentant des difficultés associées à la variation de la taille du bois, de l'humidité et des valeurs concrètes de la capacité de charge des enceintes chaudes. Ces études n'ont pas mis à l'essai la norme NIMP 15:2009 et n'ont donc pas pu être prises en considération dans l'emballage en bois. Le groupe de recherche international sur les organismes de quarantaine n'a pas été informé de cas d'interception d'*A. planipennis* dans les matériaux d'emballage en bois lors du déplacement à l'échelle internationale du bois réglementé. L'UE n'a pas signalé d'interception d'*A. planipennis* dans des produits de bois, et les États-Unis n'en ont pas non plus indiqué dans des emballages en bois. Les participants du groupe ont convenu que les mesures phytosanitaires s'appliquant dans des conditions opérationnelles normales afin de respecter les exigences de la NIMP 15:2009 sont toujours appropriées pour réduire suffisamment le risque d'*A. planipennis*.

2.4 Nématode du pin

Le nématode du pin (*Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhner) Nickle) est reconnu largement reconnu comme organismes très nuisibles dans les espèces de pin de partout dans le monde (Webster 1999). Le nématode est exclusivement transporté par les dendroctones du genre *Monochamus* (Mamiya et Enda 1972, Wingfield et Blanchette 1983, Finney-Crawley 1989). Les préoccupations concernant le déplacement des nématodes et insectes vecteurs dans les billes et bois d'œuvre infectés ont exigé que l'on s'efforce, dans les années 1980 et 1990, de déterminer des traitements qui tueraient le nématode et ses vecteurs dans les produits de bois. Divers traitements ont été évalués, y compris la fumigation et le traitement par la chaleur (Ostaf et Cech 1978, Kinn 1986, Smith 1991, Wang et coll. 1994, Tomminen et Nuorteva 1992, Soma 2001, Zheng et coll. 2001).

Il a été démontré que les traitements par la chaleur avec des températures de séchoir de 60 à 71 °C pendant 1 heure tuaient la larve du *Monochamus* présente dans le bois d'œuvre (Ostaf et Cech 1978). Ce plan de traitement a été davantage peaufiné dans le cadre d'un effort conjoint entre l'UE et l'Amérique du Nord en vue d'établir un protocole de traitement par la chaleur pour éliminer le nématode du pin et ses vecteurs (Smith 1991). Cette étude a démontré que le traitement du bois à une température centrale de 56 °C pendant 30 minutes était très efficace pour traiter le bois infesté par des nématodes du pin. Cette combinaison de température et de durée a été acceptée comme norme phytosanitaire contre les insectes et les nématodes, et constitue la base de la mesure de traitement par la chaleur dans la norme internationale pour l'emballage en bois, NIMP15 : 2009. Une étude ultérieure (Qi Longjun et coll. 2005) a fait état d'un taux de mortalité inférieur chez les nématodes présents dans l'emballage en bois traité à 56 °C pendant 30 minutes, mais il a été difficile d'interpréter les méthodes expérimentales utilisées dans l'étude, et celles-ci ne présentaient peut-être pas des conditions opérationnelles. Les études qui utilisent l'hyperfréquence et la radiofréquence comme source de chauffage ont également fait état d'un taux de mortalité de 100 % (probit-9) à 56 °C (Hoover et coll. 2010, Lazarescu et coll. 2011, Uzunovic et coll. 2012).

2.5 Bactéries

Peu de littérature a été publiée sur le traitement thermique des bactéries vivants dans le bois. Une étude réalisée par Srivastava et Patel (1970) indique que 49 °C est la température d'inactivation thermique de la *Pseudomonas azadirachtae*, une maladie bactérienne affectant le margousier (*Azadirachta indica* A. Juss.). Keck et coll. (1995) a rapporté qu'un traitement par la chaleur de moins de 30 minutes à 50 °C était mortel pour l'*Erwinia amylovora* (Burrill) Winslow et coll. sur le matériel de propagation vivant *Xanthomonas translucens* pv. *pistaciae* Giblot-Ducray et coll. survivaient dans le bois infecté exposé à des températures de 40 à 55 °C pendant au moins 60 minutes, mais étaient éliminés par une exposition à 60 °C pendant 15 minutes ou plus (Vu Thahn et coll. 2012). Des études récentes sur le *Pseudomonas syringae* pv. *aesculi* (causant du change suintant chez le marronnier d'Inde (*Aesculus* spp.)) ont indiqué une température létale de 35 à 40 °C pour les cultures *in vivo* (Mullett et Webber 2013) et de 39 °C pour la bactérie présente sur les gaules d'arbres vivants (de Keijzer et coll. 2012).

3. Protocoles d'essai de traitement

Actuellement, la NIMP 15:2009 reconnaît trois traitements, soit la chaleur, le chauffage diélectrique et la fumigation au bromure de méthyle. À mesure que de nouveaux traitements sont mis au point, pour l'emballage en bois ou autres produits de bois, il est essentiel qu'ils s'avèrent efficaces contre la vaste étendue d'organismes nuisibles pouvant être trouvés dans

le bois. La norme de la CIPV NIMP 28:2007, *Traitements phytosanitaires pour les organismes nuisibles réglementés*, décrit les exigences concernant les données à fournir dans une présentation de traitement phytosanitaire afin qu'il soit reconnu à l'échelle internationale comme mesure phytosanitaire. L'une des composantes les plus importantes de ces données est la « preuve » que le traitement est :

« efficace pour tuer, inactiver ou éliminer des organismes nuisibles ou les rendre infertiles, ou pour la dévitalisation associée à un article réglementé. »

La norme requiert également que les traitements :

« soient bien documentés pour démontrer que les données sur l'efficacité ont été produites selon les procédures scientifiques qui conviennent, y compris, lorsque cela est pertinent, un schéma expérimental. Les données soutenant le traitement doivent être vérifiables, reproductibles et fondées sur des méthodes statistiques ou sur une pratique internationale établie et acceptée.

Bien que la NIMP 28:2007 ne requiert pas de cibles d'efficacité spécifiques, les méthodes expérimentales utilisées pour déterminer les doses expérimentales des traitements ainsi que le niveau statistique de confiance soutenant les allégations d'efficacité doivent être indiquées. Lorsque les données expérimentales ne sont pas disponibles ou sont insuffisantes, il faut fournir d'autres preuves qui étayent l'efficacité (c.-à-d. des renseignements pratiques ou l'expérience).

La plupart des données sur le traitement par la chaleur du bois proviennent d'études précédentes suivant un grand nombre d'approches expérimentales différentes. Dans certaines études, on a contrôlé les températures ambiantes des séchoirs plutôt que celles du centre du bois. Peu d'organismes ont fait l'objet d'études détaillées.

Les protocoles d'essai normalisés ont rarement été utilisés et les données doivent être tirées d'études qui peuvent avoir testé des organismes nuisibles sur une variété de substrats, y compris des expériences *in vitro*, des tests sur gélose (dans le cas des champignons), sur le bois d'œuvre, les copeaux de bois et les billes entières. La majorité du travail expérimental a été réalisé sur des échantillons de spécimens de très petite taille, et peu de renseignements sur la statistique de fiabilité ont été fournis, pour ne pas dire aucun. Le travail sur le nématode du pin réalisé dans les années 1990 a pour la première fois appliqué une approche statistique rigoureuse (Smith et coll. 1991). Ce travail a conclu que les températures de 52 °C et plus tuaient tous les nématodes du pin dans les expériences *in vivo*. À la suite d'un ajustement statistique des données (une analyse par la méthode des probits avec une transformation relative à la distribution de Gompertz) afin d'établir la température requise pour atteindre un taux de fiabilité de mortalité de 99,994 % à un niveau de confiance de 95 %, il a été déterminé que la température de traitement recommandée s'élevait à 56,1 °C. Plus récemment, des analyses statistiques des données sur la relation dose-effet concernant les champignons (Ramsfield et coll. 2010) et *Agriilus planipennis* (EFSA 2011) démontrent que les températures de traitement recommandées sont influencées par les paramètres établis par les gestionnaires des risques, y compris les niveaux de contrôle voulus (c.-à-d. le taux de mortalité, souvent de 99 %, 99,9 % ou 99,99683 %), les modèles utilisés pour analyser les données et le choix du niveau statistique de confiance (p. ex., 90 %, 95 % ou 99 %). Ces méthodes statistiques sont utiles pour fournir des estimations de la fiabilité en fonction des données expérimentales, lorsque la taille limitée de l'échantillon empêche de procéder à des expériences de confirmation pour déterminer la dose efficace. Toutefois, les doses de traitement résultantes peuvent être inutilement élevées, possiblement négliger les considérations biologiques qui

limitent la survie comme les seuils de température pour dénaturer les protéines ou les effets sublétaux irréversibles sur la capacité de reproduction. De nouvelles approches pour concevoir des protocoles d'essai de traitement qui tiennent compte des difficultés se rapportant aux organismes nuisibles associés au bois sont mises au point (Haack et coll. 2011, Schortemeyer et coll. 2011) et doivent être mises en annexe de la NIMP 15:2009.

4. Comment les organismes réagissent-ils au traitement par la chaleur; mortalité – physiologie de survie

Il existe un ensemble considérable de connaissances, surtout sur les organismes nuisibles s'attaquant aux fruits et aux produits entreposés, sur les réactions physiologiques des insectes et des champignons à la chaleur (Crisan 1973, Denlinger et Yocum 1998, Neven 2000, Maheshwari et coll. 2000, Fields et White 2002, Rangel et coll. 2005).

Tableau 1 : Réponse des insectes nuisibles s'attaquant aux produits entreposés à la température (d'après Fields et White 2002)

Effet	Échelle de température (°C)	Effets
Létal	Plus de 62	Mort en moins de 1 min
	50–62	Mort en moins de 1 h
	45–50	Mort en moins de 1 jour
	35–42	Les populations disparaissent, les insectes mobiles cherchent des milieux plus frais
Sous-optimum	35	Température maximale pour la reproduction
	32–35	Croissance lente de la population
Optimum	25–32	Taux maximum pour la croissance de la population
	13–25	Croissance lente de la population
Létal	5–13	Lentement létal
	3–5	Le déplacement cesse
	de -10 à -5	Mort en semaines ou en mois en cas d'acclimatation
	de -25 à -15	Mort en moins de 1 h

Il a été démontré qu'une exposition à une température élevée affectait la synthèse et la structure des macromolécules cellulaires (p. ex., protéines, ADN, ARN, lipides, hydrates de carbone) et les structures cellulaires (p. ex., membranes, ribosomes, mitochondries). Une exposition à la chaleur peut causer une mort immédiate ou entraîner des dommages sublétaux pour la réussite du développement normale et de la reproduction, exprimée comme une fécondité ou stérilité réduite des insectes (Denlinger et Yocum 1998, Neven 2000) ou des propagules des champignons (Lifshitz et coll. 1983, Freeman et Katan 1988, Aurora et coll. 1996, Assaraf et coll. 2002). Dans les cas où le traitement du bois ne réussit pas à tuer tous les champignons pathogènes, il a été démontré que la colonisation par les organismes saprophytiques à la suite du traitement surpassait les pathogènes. Uzunovic et coll. (2008) ont indiqué que, dans les tests de laboratoire sur le bois traité par la chaleur, les champignons de moisissure saprotrophes (p. ex., *Trichoderma*, Zygomycetes,

Penicillium et *Aspergillus*) avaient colonisé le bois très rapidement, ce qui a empêché la réussite de l'isolation des champignons de bleuissement ou les champignons décomposeurs, et que les saprophytes tueraient ou surpasseraient probablement tout champignon pathogène survivant, les empêchant ainsi de se propager à partir du bois traité dans des situations réelles. De même, Munnecke et coll. (1976) ont rapporté que l'*Armillaria mellea* (Vahl) Quel. « stressé » par des doses sublétales de produits chimiques, par la chaleur ou par le séchage était par la suite tué par des micro-organismes antagonistes présents dans le sol, essentiellement la *Tricoderma* spp.

Parfois, les organismes peuvent être « préconditionnés » au traitement par la chaleur grâce à la production de protéines de choc thermique qui leur confère un niveau de thermotolérance lorsqu'ils sont soumis à des températures sublétales (Lindquist et Craig 1988, Sienkiewicz et coll. 1997). Par exemple, Yocum et Denlinger (1992), dont l'étude portait sur la mouche à viande *Sarcophaga crassipalpis* Macquart, ont démontré qu'une exposition de 2 heures à 40 °C a permis à l'organisme de survivre à un traitement par la chaleur de 90 minutes à 45 °C qui aurait autrement été léthal. Chez l'*Agrius planipennis*, Sobek et coll. (2011) ont rapporté des niveaux accrus de protéines de choc thermique, la hsp7 et ont proposé un lien entre la thermotolérance et les températures excédant la norme NIMP de 56 °C.

Les réactions des protéines de choc thermique ont été décrites dans les champignons pourrissant le bois, *Serpula lacrymans* (Wulfen) P.Karst. (Sienkiewicz et coll. 1997) et le nématode du pin, *Bursaphelenchus xylophilus* (Xie et coll. 2009).

5. Variabilité dans la thermotolérance des stades de vie

L'effet de la chaleur sur les processus physiologiques peut varier d'un stade de vie à l'autre des organismes nuisibles. L'identification des stades de vie « les plus résistants » est importante dans les essais de traitement; NIMP 28 : 2007 recommande que « lorsque plusieurs stades de vie peuvent survenir sur un article réglementé, le plus résistant doit être utilisé pour tester un traitement ». Cette directive présente une difficulté pratique considérable dans la mise au point du traitement, en raison de la quantité limitée de données publiées disponibles en ce qui concerne la thermotolérance et à acquérir des quantités appropriées de spécimens à des stades de vie spécifiques nécessaires pour les essais de traitement.

5.1 Insectes

En ce qui concerne les produits entreposés, la littérature a rapporté des différences en réaction à la chaleur entre les œufs, les jeunes larves, les larves âgées, les nymphes et les adultes des coléoptère *Tribolium confusum* (Jacquelin du Val) (Boina et Subramanyam 2004, Maroof et coll. 2004). Les différences d'un stade de vie à l'autre des organismes vivant dans le bois ont également été notées, par exemple le *Neolyctus erythrocephalus* Fab. (Snyder 1923), *Anobium punctatum* (DeGeer) (Hansen et Jensen 1996), *Tetropium fuscum* (Fabr.) (Mushrow et coll. 2004), *Agrius planipennis* (Sobek et coll. 2011). Les études qui examinent les effets des températures sur le développement du scolyte et les dynamiques des populations évoquent le sujet (Wermelinger et Seifert 2008).

5.2 Champignons et oomycètes

Les champignons et les oomycètes peuvent être présents dans le bois et sur celui-ci sous de nombreuses formes morphologiques, par exemple le mycélium, sous différents états de spores : basidiospores, ascospores, oospores, conidia, sporangia, zoospores. Les structures de champignons comme le sclerotia, chlamydospores et ascospores qui se forment parfois en réaction à des conditions physiques, chimiques, nutritionnelles ou biologiques montreraient une tolérance relative à d'autres types de cellules (Seifert et coll. 2004, Dijksterhuis 2007, Suryanarayanan et coll. 2011). Peu d'études se rapportent aux structures thermotolérantes associées aux organismes nuisibles fongiques du bois. Widmer (2011) ont démontré que les oospores du *Phytophthora kernoviae* Brasier, Beales et Kirk. survivaient à un traitement à 30 °C plus longtemps que les sporanges et le mycélium.

5.3 Nématodes du pin

Des différences dans les réactions des populations de nématodes du pin à des stades de larves, *Bursaphelenchus xylophilus*, ont été mises en corrélation avec la dessiccation, la disponibilité et le stockage des nutriments (Ishibashi et Kondo 1977, Maehara et Futai 1996). Le troisième stade de larve (J_{III}) est parfois appelé le « stade de repos » (Mamiya 1984) et compte la cuticule la plus épaisse de tous les stades de vie (Kondo et Ishibashi 1978), mais cette caractéristique n'a pas été clairement associée à la thermotolérance. Tomminen et Nuorteva (1992) n'ont pas pu démontrer que les larves au J_{III} étaient plus résistantes à la chaleur que celles aux autres stades de développement. Toutefois, Magnusson et Schröder (2009) considéraient le stade J_{III} comme important pour inclure des essais par rapport à la mortalité pour la mise au point de traitement. En s'assurant que toutes les larves de tous les stades sont présentes dans le bois au moment des essais, cette préoccupation est abordée.

Méthode pour chauffer le bois

6.1 Types d'enceinte de traitement par la chaleur et séchoirs à bois

Divers types d'équipement sont utilisés pour le traitement par la chaleur du bois. Certains sont conçus spécifiquement à des fins phytosanitaires (p. ex., des enceintes chaudes), d'autres intègrent des conditions de traitement létales dans le cadre d'un autre processus industriel (p. ex., les séchoirs à bois, l'imprégnation chimique sous pression, l'immersion dans l'eau chaude). Certaines pièces d'équipement sont spécialement conçues pour certains produits de bois, par exemple, des copeaux de bois (Dwinell et coll. 1994).

Une enceinte de traitement par la chaleur fournit et contrôle seulement la chaleur et, dans certains cas, la circulation d'air pour le traitement approprié du bois. Ces enceintes ne sont pas typiquement conçues pour sécher le bois, mais simplement pour chauffer le profil complet du bois à une certaine température et pendant une période de temps (p. ex., à 56 °C/133 °F pendant au moins 30 minutes).

Un séchoir à bois d'œuvre comprend une enceinte qui produit et contrôle la chaleur, l'humidité et la circulation d'air nécessaire pour bien sécher ou dessécher le bois. Les séchoirs à bois sont conçus pour sécher le bois pour atteindre une teneur en humidité précise avec le minimum de défaut de séchage à la suite du plan de séchoir, une série de températures et des conditions d'humidité appliquées à divers stades du processus de

séchage et de dessévage. Le bois d'œuvre séché au séchoir peut être considéré comme séché par la chaleur lorsque le plan utilisé comprend des combinaisons de durée et de températures qui respectent des exigences phytosanitaires précises.

6.1.1 Température de fonctionnement

Les enceintes de traitement par la chaleur et les séchoirs à bois sont conçues pour fonctionner dans une plage de températures spécifique. Les données suivantes représentent la classification commune des enceintes et des séchoirs selon les températures de fonctionnement maximums :

- Température conventionnelle – fonctionne dans une plage de 43 à 82 °C (de 110 à 180 °F).
- Température élevée – fonctionne dans une plage de 43 à 99 °C (de 110 à 211 °F).
- Haute température – la majorité du plan de séchage est de plus de 100 °C, habituellement dans une plage de 110 à 138 °C (de 230 à 280 °F).

Des thermocouples ou des sondes de température peuvent être utilisés pour déterminer la température centrale du bois. Lorsque l'on utilise ces instruments, il faudrait en insérer plusieurs dans la partie la plus difficile à chauffer du morceau de bois traité et les placer dans la partie la plus fraîche de l'enceinte. Les thermocouples ou les sondes de température doivent être scellés avec du matériel non conducteur afin d'empêcher l'infiltration d'air.

La plupart des enceintes chaudes ou des « séchoirs à bois » en Amérique du Nord utilisent une mesure de température adiabatique du thermomètre mouillé et de température du thermomètre sec comme autre moyen de mesurer les températures centrales du bois. La température du thermomètre sec indique la température ambiante ou de fonctionnement du séchoir. La température adiabatique du thermomètre mouillé mesure l'effet frigorigène de l'évaporation et estime la température du bois lorsqu'il est affecté par une réduction de l'humidité. La « différence psychométrique » représente la différence entre les mesures du thermomètre mouillé et thermomètre sec et sert à déterminer l'humidité relative au moyen d'un graphique hygroscopique standard. Les tests initiaux sur le bois au moyen de sondes ou de thermocouples insérés dans le bois sont normalisés par rapport aux mesures des thermomètres mouillés et à sec afin de mettre au point un plan normalisé qui peut être utilisé pour des applications de traitement en cours.

6.1.2 Source de chaleur

La plupart des enceintes et des séchoirs à bois conventionnels utilisent l'air humide ou sec pour chauffer les produits de bois au moyen d'une combinaison de conduction, de convection et de transfert de chaleur rayonnante (Tschernitz 1991). La température de l'air est élevée par chauffage électrique ou en brûlant des résidus de bois, de l'huile, du propane ou du gaz naturel. Récemment, des systèmes ont été mis au point et utilisent l'énergie diélectrique (hyperfréquence ou radiofréquence) pour chauffer le bois afin d'éliminer les organismes nuisibles présents dans le bois (Fleming et coll. 2003, 2005, Hoover et coll. 2010, Lazarescu et coll. 2011, Uzunovic et coll. 2012).

6.1.3 Fluide chauffant

Le bois qui est traité est exposé à un liquide, à une humidité élevée (vapeur) ou à un milieu où l'air est sec, ce qui a un effet important sur la durée de chauffage, puisque la chaleur est transférée plus rapidement dans l'air saturé en vapeur. Les enceintes de traitement par la chaleur et les séchoirs à bois utilisent de l'air sec ou de la vapeur; les milieux liquides peuvent être utilisés dans le cadre d'un processus d'imprégnation chimique (Taylor et Lloyd 2009).

6.2 Température et humidité

Il est très important, lorsque l'on examine le traitement du bois pour tuer les insectes et autres microorganismes, de ne pas confondre le séchage au séchoir (réduction de l'humidité) avec le traitement par la chaleur. Bien que la plupart des plans de séchage au séchoir comprennent la chaleur, il se peut que l'on atteigne des cibles de réduction de l'humidité sans appliquer des températures létales. La réduction de l'humidité seule ne suffit pas pour atteindre les objectifs phytosanitaires. Certaines espèces de champignons sont capables de résister au séchage à l'air (Uzunovic et Khadempour 2007) et peuvent survivre un maximum de 10 ans dans le bois entreposé à une humidité relative de 30 à 40 % (Wilcox 1973). De même, certains insectes peuvent survivre de longues périodes dans du bois à faible humidité. Les niveaux d'humidité au cours du traitement sont aussi déterminants. La plupart des champignons de bleuissement seront tués à des températures de 40 à 50 °C lorsque l'humidité relative est de 100 % (Seifert, 1993). Le champignon pourrissant le bois *Lenzites trabea* (Pers.) Fr. était tué par un traitement de 3 heures à 70 °C dans des conditions humides, tandis que dans des conditions sèches, à la même température, il fallait de 96 à 120 heures (Cartwright et Findlay 1958).

6.3 Problèmes et difficultés concernant le traitement par la chaleur du bois

6.3.1 Propriétés physiques du bois

Le bois est une structure cellulaire composée de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Les variations dans la proportion de ces composantes et la différence dans la structure rendent les bois lourds ou légers, rigides ou flexibles. Les propriétés (c.-à-d., la gravité, la densité, la teneur en humidité spécifiques, etc.) d'une même espèce de bois sont relativement constantes, mais varient quand même dans un même arbre et d'un arbre à l'autre, ou entre les morceaux de bois d'œuvre.

Les propriétés thermiques importantes du bois qui affectent les dynamiques du chauffage comprennent la conductivité thermique, la capacité thermique et la diffusivité thermique. La conductivité thermique est la mesure du taux de flux de chaleur traversant l'épaisseur unitaire d'un matériel lorsqu'il est soumis au gradient de température. Elle est affectée par les propriétés du bois comme la densité, le poids spécifique, la teneur en humidité, les matières extractives, le fil du bois, l'angle des fibrilles et la température. La conductivité thermique augmente à mesure que le poids spécifique, la densité, la teneur en humidité et la température du bois augmentent. La capacité thermique est la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter une unité de masse par unité de température. Elle dépend de la température et de la teneur en humidité du bois, mais pas du poids spécifique, de la densité ou de l'espèce. La capacité thermique du bois vert (humide) est supérieure à celle du bois séché. La diffusivité thermique mesure la rapidité du matériel à absorber la chaleur de son environnement; il s'agit du ratio de la conductivité thermique par rapport au produit de la densité et de la capacité thermique. En raison de la faible conductivité thermique, la

densité modérée et la capacité thermique du bois, la diffusivité thermique du bois est inférieure à celle d'autres matériaux (p. ex., le métal, la brique).

La teneur en humidité du bois est la quantité d'eau dans le bois exprimée en pourcentage de son poids à l'état sec. De nombreuses propriétés du bois (c.-à-d. le poids, le retrait, la résistance, etc.) dépendent de sa teneur en humidité. Dans les bois tendres, la teneur en humidité du bois de cœur est normalement inférieure à celle de l'aubier. Dans les bois durs, la différence dans la teneur en humidité entre le bois de cœur et l'aubier dépend de l'espèce de bois. Simpson et coll. (2005) ont indiqué que les différences dans les durées de chauffage parmi les espèces de bois dur (érable rouge, érable à sucre, le chêne rouge, le tilleul d'Amérique et le tremble) n'étaient pas importantes et dépendaient de la variabilité naturelle entre chaque planche. Ils ont conclu qu'il n'existe aucune raison pratique de traiter par la chaleur les différentes espèces de bois dur séparément.

6.3.2 Taille et structure

La taille du bois et sa structure affectent le processus de traitement par la chaleur. La durée de chauffage augmente pour les produits de bois plus gros et plus épais (figure 1). Les équarris et les billes devront être traités par la chaleur plus longtemps que le bois scié dont les dimensions sont plus petites. Les formes étranges et les dimensions variables du bois de chauffage requièrent des durées de chauffage différentes pour chaque pièce, ce qui rend plus difficile le plan de traitement qui doit être adapté au pire des scénarios (Wang et coll. 2009, 2010).

Figure 1 : Les courbes de durée de chauffage des planches dont l'épaisseur varie de 0,75 à 12 pouces (de Wang 2010)

6.4 Modèles de pénétration thermique – gradients de température

Actuellement, on procède à la plupart des traitements par la chaleur au moyen des séchoirs à bois en place pour réduire l'humidité (lorsqu'une application contrôlée de la chaleur fait partie du processus de séchage) ou les enceintes spécifiquement conçues pour le traitement par la chaleur. Il faut tenir compte d'un bon nombre de considérations afin d'atteindre une température centrale de 56 °C pour chaque morceau de bois dans un important chargement; p. ex., l'espèce du bois, la variabilité dans la densité du bois, l'humidité et la taille du morceau, la température initiale et l'uniformité de la distribution de la chaleur dans l'enceinte. Afin de contrebalancer ces variables, des sondes de contrôle de la température sont placées stratégiquement dans des morceaux sentinelles de bois ou des plans de durée et de températures sont élaborés. Dans les deux cas, les températures ambiantes de l'enceinte sont fixées à plus de 56 °C, souvent de 70 à 90 °C. Comme il faut un grand nombre d'heures au processus de traitement par la chaleur pour que tous les morceaux de bois atteignent 56 °C, la plus grande partie du bois, en particulier la « couche » extérieure et les coins de chaque morceau de bois, est chauffé à des

températures supérieures à 56 °C pendant des périodes de beaucoup plus que 30 minutes. Pour les organismes comme l'*Agrilus planipennis*, toutefois,

« Le chauffage du centre du bois à 56 °C produira un gradient de température qui dépendra de la masse et de la taille dans tous les billes, et l'habitat des espèces dans les couches extérieures, par exemple l'agrile du frêne, sera exposé à des températures considérablement plus élevées pendant de périodes plus longues que l'habitat qui se trouvent au centre. Après la fin du traitement, l'inertie thermique signifie que le bois demeurera à des températures plus élevées pendant un certain temps, ce qui permettra de s'assurer que la norme en vigueur (mise en application dans l'installation que nous examinons) suffit pour exterminer l'agrile du frêne » (Sobek et coll. 2011).

Cette logique correspond à l'analyse de modélisation réalisée par Forintek et le Service canadien des forêts (SCF) en 2007, qui a démontré que le bois de frêne traité selon les plans de traitement de bois dur du manuel PI-07 de l'ACIA était exposé à des températures supérieures à 60 °C pendant plusieurs heures (figure 2).

L'approche de plan générique adoptée par le PI-07 contient des mesures de sauvegarde suffisantes pour veiller à ce que tous les produits de bois traités selon le plan respectent la norme phytosanitaire, une température centrale minimale de 56 °C pendant au moins 30 minutes. Elle fournit une norme minimale pour atteindre la cible de traitement. Lorsque l'on a également pour objectif de réduire l'humidité, le bois est exposé à la chaleur pendant des périodes beaucoup plus longues. Par exemple, une charge typique de 4/4 (épaisseur de 29 mm) de bois de frêne débité séché à un taux d'humidité de 7 % dans un moulin à bois dur canadien, la température du bois au centre atteignait 56 °C au point de 193 heures dans un plan de séchage de 338 heures. Après 220 heures, la température centrale a dépassé 71 °C. Dans ce cas, les exigences relatives à la durée et à la température en ce qui concerne la sécurité phytosanitaire ont été largement surpassées.

Le traitement par la chaleur comme composante d'une approche des mesures intégrées

Divers processus mécaniques qui sont utilisés dans la fabrication de produits de bois provenant d'arbres, y compris les pratiques d'exploitation, l'entreposage du bois, le sciage et les processus suivant le sciage, permettent de réduire les organismes nuisibles associés (FAO 2011). Les processus transforment la structure et les propriétés physiques du bois, et réduisent généralement la qualité du substrat permettant la survie des organismes nuisibles qui peuvent avoir habité l'arbre vivant. Chacune de ces étapes réduit la prévalence des organismes nuisibles dans le bois et peut être considérée comme une mesure phytosanitaire indépendante. Conformément aux principes internationaux des mesures intégrées, l'effet cumulatif de ces processus permet une réduction du risque phytosanitaire plus importante qu'une seule mesure. Dans ce contexte, le traitement par la chaleur fait partie d'un exercice de réduction du risque plus important, et ne constitue pas la seule possibilité d'atténuer les organismes nuisibles.

La connaissance de la biologie des organismes nuisibles, de leur façon de vivre et de l'endroit où ils vivent dans l'écorce ou dans le tissu ligneux de l'arbre hôte aide à comprendre l'efficacité du traitement et à concevoir des processus efficaces pour réduire le risque. Par exemple, les stades de vie de l'*Agrilus planipennis* des œufs, des larves, des prénymphe, des nymphes et des adultes vivent dans l'écorce ou dans le tissu cambial ou de l'aubier juste sous l'écorce. Dans le bois rond de taille marchande, la plupart des stades de nymphe sont efficacement éliminés au cours de l'écorçage. Le prochain processus de production important, dans lequel les billes sont sciés en planches, élimine une grande partie de l'aubier où des loges de prénymphe se forment, dans les billes de petit diamètre. Finalement, le traitement par la chaleur du bois débité qui permet au bois d'atteindre une température centrale de 56 °C pendant 30 minutes, tue pratiquement tous les stades de vie de l'*A. planipennis* qui peuvent être présents. Combinées, ces mesures phytosanitaires indépendantes réduisent le risque phytosanitaire plus efficacement que la mise en œuvre de n'importe quelle mesure individuellement (NIMP14 : 2002).

Comme cela a été établi dans le contexte de réduction du risque par la voie de plusieurs mesures intégrées, il peut donc ne pas être nécessaire qu'une mesure de composante unique, par exemple le traitement par la chaleur, de causer un taux de mortalité de près de 100 %. Haack et coll. (2011) ont indiqué que les facteurs biologiques entraînent également en jeu et ont proposé que

« la priorité sur la mortalité comme seul critère pour évaluer la sécurité de quarantaine ne tient pas compte des facteurs axés sur les risques le long du processus, comme la probabilité d'infestation, la survie naturelle, le potentiel de reproduction et le potentiel d'établissement, de même que les paramètres de traitement comme l'emballage, les pratiques de transport et les temps de distribution ».

En modifiant l'attente selon laquelle un traitement doit assurer seul des niveaux très élevés de mortalité, on devrait favoriser une mise au point plus souple des systèmes de réduction du risque phytosanitaire. En reconnaissant la valeur quantifiable de la réduction du risque que permet un traitement associé à d'autres mesures quantifiées, on favorisera la conception de systèmes qui atteignent les cibles de réduction du risque phytosanitaire.

Appendix 1 : Exemples d'exigences relatives à l'importation de traitements par la chaleur provenant de multiples pays

Ministry for Primary Industries du gouvernement de la Nouvelle-Zélande

<http://www.biosecurity.govt.nz/imports/forests/standards/non-viable-forest-produce/sawn-wood.htm>
(consulté en juin 2013)

Options de traitement

Bois scié : Le traitement par la chaleur (ou séchage au séchoir) à une température centrale constante minimum de 70 °C pendant plus de 4 heures.

Barres, pieux, ronds et traverses en bois pour voies ferrées : Le traitement par la chaleur pendant plus de 4 heures à une température centrale constante minimum de 70 °C ou séché au séchoir à une humidité de moins de 20 % à des températures de plus de 56 °C.

Department of Agriculture Fisheries and Forestry du gouvernement de l'Australie (DAFF) 2013

<http://www.daff.gov.au/aqis/import/timber/approved-treatments-timber/heat-treatments> (consulté en juin 2013)

Le bois de calage et l'emballage en bois ne contenant pas d'écorce et ayant été soumis à un traitement par la chaleur approuvé par le DAFF dans les 21 jours précédant l'exportation, sont considérés comme traités efficacement contre les organismes de quarantaine exotiques à l'Australie, sauf lorsque le DAFF a ciblé une préoccupation spécifique relative à la quarantaine.

Les traitements par la chaleur approuvés par le DAFF sont les suivants :

1. Séchage au séchoir à des fins de quarantaine (T9912)
2. Traitement par la chaleur : 56 °C pendant 30 minutes (T9968)
3. Traitement par la chaleur de l'emballage en bois et du bois de calage conformément à la NIMP 15:2009

Bien que le plan de durée et de température pour le traitement par la chaleur T9968 soit le même que celui du traitement par la chaleur précisé dans la NIMP15:2009, les documents requis par le DAFF pour valider chacun de ces traitements par la chaleur sont différents. Veuillez consulter le document [Minimum Documentary Requirements Policy](#) pour obtenir de plus amples renseignements.

La [Heat Treatment Standard](#) (Australia DAFF 2013) de la DAFF est une méthode générale pour réaliser le traitement par la chaleur sèche afin de respecter les exigences australiennes en matière de quarantaine.

Appendix 2 : Exemples de mycètes thermophiles vivant dans le bois

Champignon	Groupe fongique	Température létale	Référence
<i>Aspergillus fumigatus</i> Fresen.	Anamorphe d'ascomycète	>82 °C	Tansey 1971
<i>Chaetomium thermophile</i> La Touche var. <i>coprophile</i> Cooney & R. Emers.	ascomycète	>60 °C	Tansey 1971
<i>Dactylomyces thermophilus</i> Sopp	ascomycète	>52 °C	Guilmo et al. 1998
<i>Humicola lanuginosa</i> (Griffon & Maubl.) Bunce	ascomycète	>83 °C	Tansey 1971
<i>Penicillium bacillisporum</i> Swift	anamorphe d'ascomycète	>52 °C	Guilmo et al. 1998
<i>Rhizomucor</i> sp	zygomycète	>52 °C	Guilmo et al. 1998
<i>Sporotrichum thermophile</i> Apinis	Anamorphe de basidiomycète	>55 °C	Semeniuk and Carmichael 1966
<i>Thermoascus aurantiacus</i> Miehe	anamorphe d'ascomycète	>82 °C	Tansey 1971

Appendix 3: Champignons Basidiomycètes qui produisent des chlamydospores (de Stalpers 1978)

Abortiporus biennis (Bull. ex Fr.) Sing.
Amylocystis lapponica (Romell) Bond. & Sing.
Anomoporia bombycina (Fr.) Pouzar
Antrodia carbonica Overh.
Antrodia malicola (Berk. & Curt.) Murr.
Antrodia oleracea Davidson & Lombard
Antrodia serialis (Fr.) Murr.
Antrodia sinuosa (Fr.) Sarkar
Antrodia vaillantii (DC. ex Fr.) Cooke
Antrodia xantha (Fr. ex Fr.) Cooke
Bjerkandera adusta (Willd. ex Fr.) P. Karst.
Bjerkandera fumosa (Pers. ex Fr.) P. Karst.
Bondarzewia berkeleyi (Fr.) Bond. & Sing.
Bondarzewia montana (Quel.) Sing.
Ceraceomyces borealis (Romell) J. Erikss. & Ryv.
Ceriporia alachuana Murr.
Ceriporiopsis rivulosa (Berk. & Curt.) Cooke
Climacocystis borealis (Fr.) Imaz.
Climacodon septentrionalis (Fr.) P. Karst.
Veluticeps fimbriata (Pers. ex Fr.) Pouzar
Daedalea quercina (L.) ex Fr.
Dichomitus squalens (P.Karst.) D. Reid
Dichostereum effuscatum (Cooke & Ellis) D.P. Rogers & H.S. Jacks.
Dichostereum pallescens (Schw.) D.P. Rogers & H.S. Jacks.
Diplomitoporus lindbladii (Berk. & Br. ex Berk.) Cooke
Echinodontium tinctorium Ellis & Everh
Fistulina hepatica (Schaeff.) ex Fr.
Fomitopsis cajanderi (P. Karst.) Kotl. & Pouzar
Fomitopsis meliae Underw.
Fomitopsis officinalis (Vill. ex Fr.) Donk
Fomitopsis palustris Berk. & Curt.
Fomitopsis pinicola (Schw. ex Fr.) P. Karst
Fomitopsis spraguei Berk. & Curt.
Ganoderma colossum (Fr.) C.F. Baker
Ganoderma lucidum Boud. apud Pat.
Gloeocystidiellum porosum (Berk. & Curt.) Donk
Gloeophyllum abietinum (Bull. ex Fr.) P. Karst.
Gloeophyllum odoratum (Wulf. ex Fr.) Imaz
Gloeophyllum protractum (Fr.) Imaz.
Gloeophyllum sepiarium (Wulf. ex Fr.) P. Karst.
Gloeophyllum striatum (Sw. ex Fr.) Murr.
Gloeophyllum trabeum (Pers. ex Fr.) Murr.
Grifola frondosa (Dicks. ex Fr.) S. F. Gray

Hapalopilus croceus (Pers. ex Fr.) Donk
Hapalopilus mutans Peck
Hericium coralloides (Scop. ex Fr.) S.F. Gray
Hericium erinaceus (Bull. ex Fr.) Pers.
Hymenochaete rubiginosa (Dicks. ex Fr.) Lev.
Hyphodermella corrugata (Fr.) Bres.
Hypochnicium vellereum (Ell. & Cragin) Parm.
Hypochnicium vellereum (Ell. & Cragin) Parm.
Inonotus rickii (Pat.) D. Reid
Laetiporus sulphureus (Bull. ex Fr.) Bond. & Sing.
Laxitextum bicolor (Fr.) Lentz
Megalocystidium lactescens (Berk.) Boidin
Melanoporia nigra (Berk.) Cooke
Microporellus obovatus Berk. & Curt.
Mycoacia fuscoatra (Fr.) Donk
Osteina obducta (Berk.) Donk
Perenniporia compacta Overh.
Perenniporia fraxinophila (Peck) Ryv.
Perenniporia robinophila (Murr.) Lloyd
Phaeolus schweinitzii (Fr.) Pat.
Phanerochaete chrysosporium Burds. & Eslyn
Phanerochaete sordida (P. Karst.) Burt
Phlebia merismoides Fr.
Phlebia subserialis H. S. Jacks. & Dearden
Phlebia subserialis (Bourd. & Galz.) Donk
Phlebia tremellosus Schrad. ex Fr.
Phlebia chrysocreas (Berk. & Curt. apud Berk.) Burdsall
Piptoporus betulinus (Bull. ex Fr.) P. Karst
Polyporus brumalis (Pers. ex Fr.) Fr.
Polyporus mori (Bosc.) ex Fr.
Poria aurea Peck
Postia amara (Hedgec.) Lowe
Postia balsamea (Peck) Murrill
Postia placenta (Fr.) Cooke
Postia salmonicolor (Berk. & Curt.) Pouzar
Postia sericeomollis (Rom.) Bond. & Sing.
Postia tephroleuca (Fr.) Donk
Punctularia atropurpurascens (Berk. & Br.) Petch
Pycnoporus cinnabarinus (Jacq. ex Fr.) P. Karst
Pycnoporus sanguineus (L. ex Fr.) Murr.
Radulodon casearium Ryv.
Schizophyllum commune Fr.
Sparassis crispa (Wulf. ex Fr.) Fr.
Spongipellis delectans (Peck) Murr.
Spongipellis pachyodon (Pers.) Kotl. & Pouzar
Spongipellis unicolor (Schw.) Murr.

Sporotrichum pruinatum Novobranova
Trametes cubensis (Mont.) Sacc.
Trametes pubescens (Schum. ex Fr.) Pilat
Trametes suaveolens (Fr.) Fr.
Trametes versicolor (L. ex Fr.) Pilat
Tryomyces chioneus (Fr. ex Fr.) P Karst
Tryomyces fissilis (Berk. & Curt.) Donk
Tryomyces fumidiceps Atk.
Vararia granulosa (Fr.) Laurila
Veluticeps berkeleyi

Références

(la police grasse identifie les références citées dans le texte)

- Aleon, D. 2003. Phytosanitary protection of timber with heat treatments. / Protection phytosanitaire du bois par traitement thermique. CTBA Info 37-42.
- Aleon, D. 2004. Phytosanitary heat treatment of wood. / Traitement phytosanitaire du bois par chauffage à coeur. Bulletin OEPP 34: 133-138.
- Allen, E. A. et Humble, L. M. 2002. Nonindigenous species introductions: a threat to Canada's forests and forest economy. Canadian Journal of Plant Pathology 24(2): 103-110.**
- Ambrogioni, L., Cavalli, M., Coniglio, D., Roversi, F.P., et Caroppo, S. 2005. Heat treatment by microwaves irradiation: a possible solution for sanitizing nematode infected wood. / Trattamento al calore mediante irradiazione a microonde: una possibile soluzione nel contenimento della nematofauna associata al legno. Nematologia Mediterranea 33: 79-86.
- Annala, E. 1969. Influence of temperature upon the development and voltinism of *Ips typographus* L. (Coleoptera, Scolytidae). Ann. Zool. Fennici 6: 161-208.**
- Anonyme. 1991. The development of treatment schedules to ensure eradication in timber of the pinewood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) and its insect vectors. Final Report. ELOAS.
- APS. 1999. Resolution on wood importation. Council of The American Phytopathological Society, January 1999.
- Armstrong, J. W. et Mangan, R. L. 2007. Commercial quarantine heat treatments, pp. 311-340. In: J. Tang, E. Mitcham, S. Wang, and Lurie, S. (eds.), Heat treatments for postharvest pest control. CAB International, Wallingford, Oxfordshire, United Kingdom.
- Assaraf, M. P., Ginzburg, C., et Katan, J. 2002. Weakening and delayed mortality of *Fusarium oxysporum* by heat treatment: Flow cytometry and growth studies. Phytopathology 92:956-963.**
- Aurora, D. K., Pandey, A. K., et Srivastva, A. K. 1996. Effects of heat stress on loss of C, germination and pathogenicity from chlamydospores of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceri*. Siol Biol. Biochem 28: 399-407.**
- Baker, A. C. 1939. The basis for treatment of products where fruit flies are involved as a condition for entry into the United States. USDA Circ. 553: 1-7.
- Baker, AC. 1952. The vapour heat process. In: US Department of Agriculture Yearbook. US Government Printing Office, Washington, DC, pp. 401-404.
- Barnes, H.M. et Williams, L.H. 1988. Integrated protection against lyctid beetle infestations. VI. Thermal treatment of tropical hardwood lumber with polyborates. For. Prod. J. 38: 20-21.
- Benker, U. 2008. Stowaways in wood packaging material - current situation in Bavaria. Forstschutz Aktuell 30-31.
- Boina, D. et Subramanyam, B. 2004. Relative susceptibility of *Tribolium confusum* (Jacquelin du Val) life stages to elevated temperatures. Journal of Economic Entomology 97: 2168-2173.**
- Cartwright, K. et W.P.K. Findlay. 1958. *Decay of Timber and its Prevention*. Forest Her Majesty's Stationary Office 2 ed. Londre. 332 pp.

- Chapman, A.D. 1933. Effect of steam sterilization on susceptibility of wood to blue-staining and wood-destroying fungi. *Journal of Agricultural Research* 369-374.
- Chen, Z., Poland, T.M., Clark, E.L., White, M.S., et Keena, M.A. 2008. Evaluation of vacuum technology to kill larvae of the Asian longhorned beetle, *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae), and the emerald ash borer, *Agilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae), in wood [electronic resource]. *For. Prod. J.* 58: 87-93.
- Chidester, M.S. 1937. Temperature necessary to kill fungi in wood. *Proceedings American Wood-Preservers' Association* 33: 316-324.**
- Chidester, M.S. 1939. Further studies on temperatures necessary to kill fungi in wood. *Amer. Wood Pres. Ass. [Division of Forest Pathology, Bureau of Plant Industry, U. S. D. A.***
- Cooper, P., Albright, M., Srinivasan, U., et Ung, T. 1998. Temperature development and sterilization of red pine poles during CCA treatment, elevated temperature fixation and drying. *Material und Organismen* 32: 127-143.
- Cooper, P.A., Ung, Y.T., et Wang, J. 2007. "An order of deep-fried two-by-fours please!". *For. Chron.* 83: 475-477.
- Craighead, F. C. 1921. Temperatures fatal to larvae of the red-headed ash borer as applicable to commercial kiln drying. *Jour. of Forestry* 19: 250-254.**
- Crisan, E.V. 1973. Current concepts of thermophilism and the thermophilic fungi. *Mycologia* 65: 1171-1198.**
- DAFF - Australian Department of Agriculture Fisheries and Forestry. 2013. Heat Treatment Standard http://www.daff.gov.au/agis/import/general-info/gftp/treatments-fumigants/agis_heat_treatment_standard (consulté en juin 2013).**
- de Keijzer J., van den Broek L.A.M., Ketelaar T., et van Lammeren, A.A.M. 2012. Histological examination of horse chestnut infection by *Pseudomonas syringae* pv. *aesculi* and non-destructive heat treatment to stop disease progression. *PLoS ONE* 7(7): e39604. doi:10.1371/journal.pone.0039604**
- Denlinger, D.L. et Yocum, G.D. 1998. Physiology of heat sensitivity. In: Hallman GJ, Denlinger DL, eds. 1998. *Temperature Sensitivity in Insects and Application in Integrated Pest Management*. Boulder, CO: Westview. 311 pp.**
- Dijksterhuis, J. 2007. Heat-resistant ascospores. In: Dijksterhuis, J. and Samson, R. A. (Eds.). (2007). *Food mycology: a multifaceted approach to fungi and food (Vol. 25)*. CRC.**
- Dwinell, L.D. 1986. Ecology of the pinewood nematode in southern pine chip piles. USDA For. Service,
- Dwinell, L.D. 1987. Pinewood nematode in southern pine chips exported from Georgia. In: Series Title: Pathogenicity of the pine wood nematode. APS Press, St. Paul, MN p. 50-57.
- Dwinell, L.D. 1990. Heat-treating and drying southern pine lumber infested with pinewood nematodes. *Forest Products Journal* 40: 53-56.
- Dwinell, L.D. 1990. Thermal death point of *Bursaphelenchus xylophilus* in southern pine chips. *Nematologica* 36: 346.

Dwinell, L.D. 1994. Using heat to decontaminate pine chips infested with the pinewood nematode. Annual Intl. Res. Conf. Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions 961-962.

Dwinell, L.D. 1995. Annual Meeting: Forest Products Society. Juin.

Dwinell, L.D. 1996. Alternatives to methyl bromide for eradicating pests in exported softwood chip, lumber, and logs. USDA Methyl Bromide Alternatives Newsletter 2: 78.

Dwinell, L.D. 1996. Methyl bromide alternatives for decontaminating softwood chips, lumber and logs. Annual Res. Conf. on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions. 4-6 nov. 6: 641-643.

Dwinell, L.D. 1996. Using heat to decontaminate softwood chips, lumber and logs. Conf. Importing Wood Products: Pest Risks to Domestic Industries. 4-6 mars.

Dwinell, L.D. 1997. The pinewood nematode: regulation and mitigation. Annual Review of Phytopathology 35: 153-166.

Dwinell, L.D. 2000. Effect of methyl bromide on *Bursaphelenchus xylophilus* in pine wood. In: Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions, 6-9 November 2000, Orlando, Fl. 71-1,3.

Dwinell, L.D. 2001. Potential use of elevated temperature to eradicate fungi in white oak wood. (abstract) Phytopathology 91:S25. Publication No. P-2001-0174-AMA.

Dwinell, L.D. et Carr, W.W. 1991. Using radio waves to eradicate *Bursaphelenchus xylophilus* in southern pine chips. J. Nematol. 23: 527.

Dwinell, L.D. et Carr, W.W. 1995. Radio waves and steam, alone or in combination, for the eradication of *Bursaphelenchus xylophilus* in southern pine chips. Annual Intl. Res. Conf. on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions. 6-8 nov. 81-1,3.

Dwinell, L.D., Avramidis, S., et Clark, J.E. 1994. Evaluation of a radio frequency/vacuum dryer for the eradication of the pine wood nematode in green sawn wood. Forest Prod. J. 44: 19-24.

Dwinell, L.D., Chung, Y., Lee, D., et Yi, C. 1995. Heat treating loblolly pine lumber to eradicate *Bursaphelenchus xylophilus*: Verification tests. Annual Intl. Res. Conf. on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions. 6-8 nov. 80-1,3.

Dwinell, L.D., Magnusson, C., et Tomminen, J. 1994. Evaluation of a Swedish steam-dryer for treatment of *Bursaphelenchus xylophilus* in pine chips. Bulletin-OEPP 24: 805-811.

Ebeling, W. 1994. Heat penetration of structural timbers. Technical note (Forest Engineering Research Institute of Canada). Technical note 16: 9-10.

EFSA. 2011. EFSA Panel on Plant Health (PLH); Scientific opinion on a technical file submitted by the US authorities to support a request to list a new option among the EU import requirements for wood of *Agrilus planipennis* host plants. EFSA Journal 2011; 9(7):2185. [51 pp.] doi:10.2903/j.efsa.2011.2185. Disponible en ligne: www.efsa.europa.eu/efsajournal

Eom, C.D., Han, Y.J., Shin, S.C., Chung, Y.J., Jung, C.S., et Yeo, H.M. 2007. Study on heat treatment of red pine log. Mokchae Konghak = Journal of the Korean Wood Science and Technology 35: 50-56.

European Commission. 1992. Commission Directive 92/103/EEC of 1 December 1992 amending Annexes I to IV to Council Directive 77/93/EEC on protective

- measures against the introduction into the Community of organisms harmful to plants or plant products and against their spread within the Community. Official Journal No. L 363, 11.12.1992, p. 1.
- Evans, D.E. 1981. The influence of some biological and physical factors on the heat tolerance relationships for *Rhyzopertha dominica* (F.) and *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Bostrichidae and Curculionidae). Journal of Stored Products Research 17: 65–72.
- FAO. 2011. Guide pour la mise en oeuvre des normes phytosanitaires dans le secteur forestier. Étude FAO Forêts 164. 101 pp. Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation, Rome, Italie.
- Fields, P. G. et White, N. D. 2002. Alternatives to Methyl Bromide Treatments for Stored-Product and Quarantine Insects 1. Annual Review of Entomology 47(1): 331-359.
- Finney-Crawley, J.R. 1989. Investigation to determine the insect vectors of pinewood nematode in Canada. Contract report to Forestry Canada, Newfoundland and Labrador Region, St. John's, Newfoundland. 73 pp.
- Fleming, M.R., Hoover, K., Janowiak, J.J., Fang, Y., Wang, X., Liu, W., Wang, Y., Hang, X., Agrawal, D., Mastro, V.C., Lance, D.R., Shield, J.E., et Roy, R. 2003. Microwave irradiation of wood packing material to destroy the Asian longhorned beetle. For. Prod. J. 53: 46-52.
- Fleming, M.R., Janowiak, J.J., Kimmel, J.D., Halbrendt, J.M., Bauer, L.S., Miller, D.L., et Hoover, K. 2005. Efficacy of commercial microwave equipment for eradication of pine wood nematodes and *cerambycid* larvae infesting red pine. For. Prod. J. 55: 226-232.
- Flores, A., Suszkiw, J., et Wood, M. 2003. Radio frequency puts the heat on plant pests. Agricultural Research 51: 15-17.
- Forest Products Research Laboratory. 1957. The kiln sterilization of *Lyctus*-infested timber. Dept. Sci. and Ind. Res., For. Prod. Res. Lab, Rep. Leaflet 13.
- Freeman, S. et Katan, J. 1988. Weakening effect on propagules of *Fusarium* by sublethal heating. Phytopathology 78: 1656-1661.
- French, J.R.R. et Johnstone, R.S. 1968. Heat sterilization of block stacked timber in wood-destroying insect control. J. Inst. Wood Sci. 20: 42-46.
- Gilbert, J., Woods, S.M., Turkington, T.K., et Tekauz, A. 2005. Effect of heat treatment to control *Fusarium graminearum* in wheat seed. Canadian journal of plant pathology = Revue Canadienne de Phytopathologie 27: 448-452.
- Goebel, C.P., Bumgardner, M.S., Herms, D.A., et Sabula, A. 2010. Failure to phytosanitize ash firewood infested with emerald ash borer in a small dry kiln using ISPM-15 standards. Journal of Economic Entomology 103: 597–602.
- Graham, S. A. 1924. Temperature as a limiting factor in the life of subcortical insects. Journal of economic entomology 17(3): 377-383.
- Guilmo, S.M.P., Auer, C.G., et Barrichelo, L.E.G. 1999. Effect of thermophilic fungi on wood of *Eucalyptus saligna*. III. The fungal population. Boletim-de-Pesquisa-Florestal. 37:89-95.
- Haack, R. A., Hérard, F., Sun, J., et Turgeon, J. J. 2010. Managing invasive populations of Asian longhorned beetle and citrus longhorned beetle: a worldwide perspective. Annual Review of Entomology, 55, 521-546.

- Haack, R.A. et Petrice, T.R. 2010. Incidence of live woodborers in firewood: Survey at the Mackinac Bridge. IFQRG-8 (International Forest Quarantine Research Group) Oeiras, Portugal, 2010**
- Haack, R.A., Petrice, T.R., et Nzokou, P. 2007. Do bark beetles and wood borers infest lumber following heat treatment? the role of bark. In: Proceedings, 17th U.S. Department of Agriculture Interagency Research Forum on Gypsy Moth and Other Invasive Species, 2006 : 10-13 janvier, 2006 p. 46-46.
- Haack, R. A., Uzunovic, A., Hoover, K., et Cook, J. A. 2011. Seeking alternatives to probit 9 when developing treatments for wood packaging materials under ISPM No. 15. EPPO Bulletin 41(1): 39-45.**
- Hansen, J. D. et Johnson, J. A. 2007. Introduction. In: J. Tang, E. Mitcham, S. Wang, et S. Lurie (eds.), Heat treatments for postharvest pest control. CAB International, Wallingford, Oxfordshire, United Kingdom.
- Hansen J.D., Johnson, J.A. et Winter D.A. 2011. History and use of heat in pest control: a review. *International Journal Pest Management* 57(4):267-289.
- Hansen, L. S. et Jensen, K. M. V. 1996. Upper lethal temperature limits of the common furniture beetle *Anobium punctatum* (Coleoptera: Anobiidae). *International biodeterioration & biodegradation* 37(3): 225-232.
- He, W., Simonsen, W.J., Chen, H., et Morrell, J.J. 1997. Evaluation of the efficacy of selected thermal boron treatments in eliminating pests in freshly peeled Douglas-fir logs. *For. Prod. J.* 47: 66-70.
- Heather, N.W. et Hallman, G.J. 2008. Phytosanitary heat treatments. In: Pest Management and Phytosanitary Trade Barriers. Wallingford, UK: CAB International, p. 111-131.
- Hoover, K., Uzunovic, A., Gething, B., Dale, A., Leung, K., Ostiguy, N., et Janowiak, J. J. 2010. Lethal temperature for pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in infested wood using microwave energy. *Journal of Nematology* 42(2): 101.**
- Hopping, G.R. et Jenkins, J.H. 1933. The effect of kiln temperatures and air-seasoning on ambrosia insects (pinworms). Can Dept. Interior, For. Serv, Rep. Circ. 38.
- Huang, L., Chen, B., et Kang, L. 2007. Impact of mild temperature hardening on thermo tolerance, fecundity, and HSP gene expression in *Liriomyza huidobrensis*. *Journal of Insect Physiology* 53: 1199–1205.**
- Hubert, E.E. 1924. Effect of kiln drying, steaming and air seasoning on certain fungi in wood. USDA, Rep. USDA Dept. Bull. No. 1262.
- Hulme, M.A. and Stranks, D.W. 1976. Heat tolerances of fungi inhabiting chip piles. *Wood Science* 8: 237-241.
- Humphrey, C.J. et Siggers, P.V. 1934. Temperature relations of wood-destroying fungi. *J. Agric. Res.* 47: 997-1008. Ishibashi, N. and Kondo, E. 1977. Occurrence and survival of the dispersal forms of pinewood nematode, *Bursaphelenchus lignicolus*. *Applied Entomology and Zoology*, 12, 293-302.**
- Janson, R. et Farrell, R.L. 2000. Identification of fungal infections in imported timber. University of Waikato, Rep. Project Code MBS 304.
- Jaynes, R.A. et DePalma, N.D. 1984. Natural infection of nuts of *Cattanea dentata* by *Endothia paratitica*. *Phytopathology* 74: 296-299.**

- Jones, T.W. 1973. Killing the oak wilt fungus in logs. *For. Prod. J.* 23: 52-54.
- Kappenburg, K.W. 1998. Evaluation of alternative quarantine procedures for North American oak timber to replace MB / Evaluierung alternativer quarantantechniken zum ersatz von methylbromid bei der behandlung nordamerikanischen eichenholzes. Inauguraldissertation zur erlangung der Doktorwurde, 140.
- Keck M., Chartier R., Zislavsky W., Lecomte P., et Paulin J.P. 1995. Heat treatment of plant propagation material for the control of fire blight. *Plant Pathology* 44:124-129.
- Kinn, D.N. 1986. Heat-treating wood chips: a possible solution to pine wood nematode contamination. *Tappi J.* 69: 97-98.
- Kocaefe, D., Shi, J.L., Yang, D.Q., et Zhang, J. 2007. Preliminary study of thermal treatment effects on mold growth of selected Quebec wood species. *For. Prod. J.* 57: 30-33.
- Kondo, E. et Ishibashi, N. 1978. Ultrastructural differences between the propagative and dispersal forms in pine wood nematode, *Bursaphelenchus lignicolus*, with reference to the survival. *Applied entomology and zoology* 13(1): 1-11.
- Kurpik, V.W. et Wazny, J. 1978. Lethal temperatures for the wood-destroying fungi *Coniophora putanea* Fr. and *Gloeophyllum sepiarium* (Wulf.) Karst. *Material und Organismen* 13: 1-12.
- Lazarescu, C., Breuil, C., Avramidis, S., Plattner, A., et Hart, F. 2009. Pasteurization of hemlock by radio frequency heating: a preliminary study. *For. Prod. J.* 59: 79-83.
- Lazarescu, C., Dale, A., Uzunovic, A., Breuil, C., et Avramidis, S. 2011. Radio frequency heating pasteurization of pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) infected wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 69(4):573-578.
- Lewis Jr., R. 1985. Temperature tolerance and survival of *Ceratocystis fagacearum* in Texas. *Plant Dis.* 69: 443-444.
- Liebhold A.M., MacDonald W.L., Bergdahl D., et Mastro, V.C. 1995. Invasion by exotic forest pests: a threat to forest ecosystems. *Forest Science* 41: 1-49.
- Lifshitz, R., Tabachnik, M., Katan, J., et Chet, I. 1983. The effect of sublethal heating on sclerotia of *Sclerotium rolfsii*. *Canadian Journal of Microbiology* 29:1607-1610.
- Lindgren, R.M. 1942. Temperature, moisture and penetration studies of wood staining *Ceratostomellae* in relation to their control. USDA, Rep. Tech. Bull. 807.
- Lindquist, S. et Craig, E.A. 1988. The heat-shock proteins. *Annu Rev Genet.* . 22:631– 677.
- MacLean, J.D. 1930. Studies of heat conduction in wood-results of steaming green round southern pine timbers. *Proc. American Wood-Preservers' Assoc* 26: 197-217.
- MacLean, J.D. 1932. Studies of heat conduction in wood -Part II-Results of steaming green sawn southern pine timbers. *Proc. Wood-Preservers' Assoc.* 28: 303-329.
- Maehara, N. et Futai, K. 1996. Factors affecting both the numbers of the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: Aphelenchoididae), carried by the Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* (Coleoptera:

- Cerambycidae), and the nematode's life history. *Applied entomology and zoology* 31(3): 443-452.
- Magnusson, C. et Schröder, T. 2009. Technical protocol for testing nematodes during treatment development. IFQRG-7, International Forestry Quarantine Research Group, 14-17 septembre 2009, Rome, Italie.
- Maheshwari, R., Bharadwaj, G., et Bhat, M.K. 2000. Thermophilic fungi: Their physiology and enzymes. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 64:461-488.
- Mamiya, Y. et Enda, N. 1972. Transmission of *Bursaphelenchus lignicolus* by *Monochamus alternatus*. *Nematologica* 18:159-162.
- Mamiya, Y. 1984. The pine wood nematode. In: Plant and insect nematodes, Nickle W.R. (ed) Marcel Dekker, New York. P. 589-626.
- Mahroof, R., Subramanyam, B., Throne, J. E., et Menon, A. 2003. Time-mortality relationships for *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) life stages exposed to elevated temperatures. *Journal of Economic Entomology* 96(4): 1345-1351.
- Mayfield III, A. E., Fraedrich, S. W., Taylor, A., Merten, P., & Myers, S. W. 2014. Efficacy of Heat Treatment for the Thousand Cankers Disease Vector and Pathogen in Small Black Walnut Logs. *Journal of economic entomology*, 107(1), 174-184.
- McCullough, D.G., Poland, T.M., Cappaert, D., Clark, E.L., Fraser, I., Mastro, V., Smith, S., et Pell, C. 2007. Effects of chipping, grinding, and heat on survival of emerald ash borer, *Agilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae), in chips [electronic resource]. *J. Econ. Entomol.* 100: 1304-1315.
- Myers, S W.; Bailey, S. M. 2011. Evaluation of a Heat Treatment Schedule for the Asian Longhorned Beetle, *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae). *Forest Products Journal*. Vol. 61:46-49.
- Miric, M. et Willeitner, H. 1984. Lethal temperature for some wood-destroying fungi with respect to eradication by heat treatment. Inter. Res. Group on Wood Preservation, Rep. Doc. No. IRG/WP/1229.
- Mironidis, G.K. et Savopoulou-Soultani, M. 2010. Effects of heat shock on survival and reproduction of *Helicoverpa armiger* (Lepidoptera: Noctuidae) adults. *Journal of Thermal Biology* 35: 59–69.
- Montgomery, H.B.S. 1936. An investigation of the temperatures lethal to some wood-decaying fungi. *Trans. Brit. Mycol. Soc.* 20: 293-298.
- Morrell, J.J. 1995. Importation of unprocessed logs into North America: a review of pest mitigation procedures and their efficacy. *For. Prod. J.* 45: 41-50.
- Morrell, J.J. 1996. Methods for mitigating the risks associated with unprocessed wood into the United States. *Importing Wood Products Conf: Pest Risks to Domestic Industries*. Portland, OR. March 4-6, p. 27-32.
- Morrell, J.J. et Newbill, M.A. 1991. Survival of basidiomycetes in Cellon-treated Douglas-fir heartwood. *For. Prod. J.* 41: 37-39.
- Morrell, J.J., Freitag, C.M., et Eddington, C. 2001. Effect of preservative treatment on survival of fungi in western red cedar utility poles. *For. Prod. J.* 51: 69-72.

- Morton, L.H.G. et Eggins, H.O.W. 1979. A survey of the thermophilous cellulolytic fungi of imported softwoods and of in-service timber joinery. *Material-und-Organismen* 14: 205-213.
- Mullett, M. S. et Webber, J. F. 2013. *Pseudomonas syringae* pv. *aesculi*: foliar infection of *Aesculus* species and temperature–growth relationships. *Forest Pathology* doi: 10.1111/efp.12040.
- Munnecke, D.E., Wilbur, W., et Darley, E.F. 1976. Effect of heating or drying on *Armillaria mellea* or *Tricoderme viride* and the relation to survival of *A. mellea* in soil. *Phytopathology* 66: 1363-1368.
- Mushrow, L., Morrison, A., Sweeney, J., et Quiring, D. 2004. Heat as a phytosanitary treatment for the brown spruce longhorn beetle. *The Forestry Chronicle* 80(2): 224-228.
- Myers, S. W., Fraser, I., et Mastro, V. C. 2009. Evaluation of heat treatment schedules for emerald ash borer (Coleoptera: Buprestidae). *Journal of Economic Entomology* 102 (6): 2048-2055.
- Nelson, E.E. et Fay, H. 1974. Thermal tolerance of *Poria weirii*. *Can. J. For Res.* 4: 288-290.
- Neven, L.G. 2000. Physiological responses of insects to heat. *Postharvest Biology and Technology* 21:103-111.
- Newbill, M.A. et Morrell, J.J. 1991. Effects of elevated temperatures on the survival of Basidiomycetes that colonize untreated Douglas-fir logs. *For. Prod. J.* 41: 31-33.
- New Zealand Ministry for Primary Industries (NZ MPI). 2013. Import Requirements for sawn wood. <http://www.biosecurity.govt.nz/imports/forests/standards/non-viable-forest-produce/sawn-wood.htm> (consulté en juin 2013).
- NIMP 14. 2002. *L'utilisation de mesures intégrées dans une approche systémique de gestion du risqué phytosanitaire*. Rome, CIPV, FAO
- NIMP 15. 2002. *Réglementation des matériaux d'emballage en bois utilisés dans le commerce international*. Rome, CIPV, FAO.
- NIMP 28. 2007. *Traitements phytosanitaires contre les organismes nuisibles réglementés*. Rome, CIPV, FAO.
- Nzokou, P., Kamdem, D.P., et Tourtellot, S. 2008. Kiln and microwave heat treatment of logs infested by the emerald ash borer (*Agrilus planipennis* Fairmaire) (Coleoptera: Buprestidae). *For. Prod. J.* 58: 68-72.
- Ostaff, D.P. et Cech, M.Y. 1978. Heat sterilization of spruce-pine-fir lumber containing pine sawyer beetle larvae (Coleoptera: *Cerambycid monochamus*). *Canadian Forest Service, Rep. OPX-200E*.
- Palmer, J.G. et Payne, R.G. 1986. The effects of supraoptimal temperatures upon the North American brown-rot fungi in pure culture. *Can. J. For. Res.* 16: 169-176.
- Parkin, E.A. 1937. The kiln-sterilization of timber infested by *Lyctus* powder-post beetles. *J. For.* 11: 32-39.
- Powell, M.R. 2002. A model for probabilistic assessment of phytosanitary risk reduction measures. *Plant Dis.* 86: 552-557.
- Qi Longjun, Shong Shaoyi, Yan Zhenfen et Yu Xiang (Shanghai Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau. 200135). 2005. Study on the effect of heat treatment for pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, within

imported wood packaging materials. Chinese Academy of Inspection and Quarantine. Plant Quarantine 6:19 325-329.

- Rangel, D. E., Braga, G. U., Anderson, A. J., et Roberts, D. W. 2005. Variability in conidial thermotolerance of *Metarhizium anisopliae* isolates from different geographic origins. *Journal of invertebrate pathology* 88(2): 116-125.
- Ramsfield, T. D., Ball, R. D. , Gardner, J. F. et Dick, M. A. 2010. Temperature and time combinations required to cause mortality of a range of fungi colonizing wood, *Canadian Journal of Plant Pathology*, Premiere publication le: 26 juillet 2010 (iFirst) Pour consulter cet article: DOI: 10.1080/07060661.2010.499269 URL: <http://dx.doi.org/10.1080/07060661.2010.499269>
- Scheffer, T.C., et Chidester, M.S. 1943. Significance of air-dry wood in controlling rot caused by *Poria incrassata*. *Sth. Lumberm.* (2091) 166: 53-55.
- Scheffer, T.C. et Chidester, M.S. 1948. Survival of decay and blue-stain fungi in air-dry wood. *Sth. Lumberm.* 177: 110-112.
- Scheffrahn, R.H., Wheeler, G.S., et Su, N. 1997. Heat tolerance of structure-infesting drywood termites (Isoptera: Kalotermitidae) of Florida. *Sociobiology* 29: 237-245.
- Schmidt, E.L. et Westberg, C. 2001. Heartwood temperatures of red pine pole stock during pentachlorophenol pressure treatment and presence of decay fungi prior to treatment. *For. Prod. J.* 51: 41-44.
- Schmidt, O. 2006. Wood and tree fungi: biology, damage, protection, and use. Springer. Berlin, Heidelberg, New York.**
- Schortemeyer, M., Thomas, K., Haack, R. A., Uzunovic, A., Hoover, K., Simpson, J. A., et Grgurinovic, C. A. 2011. Appropriateness of probit-9 in the development of quarantine treatments for timber and timber commodities. *Journal of Economic Entomology* 104(3): 717-731.
- Scott, M., Berrigan, D., et Hoffmann, A.A. 1997. Costs and benefits of acclimation to elevated temperature in *Trichogramma carverae*. *Entomologica Experimentalis et Applicata* 85: 211–219.
- Seehan, G. 1965. Effect of the drying and heating of softwoods on the growth of blue-stain fungi / Uber die wirkung einer trocknung und erwanrmang von nadelholz auf das wachstum von blauepilzen. *Holz als Roh und Werkstoff* 23: 341-347.
- Seifert, K. A., Nickerson, N. L., Corlett, M., Jackson, E. D., Louis-Seize, G., et Davies, R. J. 2004. *Devriesia*, a new hyphomycete genus to accommodate heat-resistant, cladosporium-like fungi. *Canadian Journal of Botany* 82(7): 914-926.**
- Seifert, K.A. 1993. Sapstain of commercial lumber. Dans: Sapstain of commercial lumber. APS Press, St. Paul MN pp. 293.
- Semeniuk, G. and Carmichael, J.W. 1966. *Sporotrichum thermophile* in North America. *Can. J. Bot.* 44:105-8.
- Sienkiewicz, N., Buultjens, T. E. J., White, N. A., et Palfreyman, J. W. 1997. *Serpula lacrymans* and the heat-shock response. *International Biodeterioration and Biodegradation* 39: 217-224.
- Simpson, W.T. 2001. Heating times for round and rectangular cross sections of wood in steam. USDA For Serv For Prod Lab Gen Tech Report.

- Simpson, W.T. 2002. Effect of wet bulb depression on heat sterilization time of slash pine lumber. Res. Pap. FPL-RP-604. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 6 p.
- Simpson, W.T. 2006. Estimating heating times of wood boards, square timbers, and logs in saturated steam by multiple regression. For. Prod. J. 56: 26-28.
- Simpson, W.T., Wang, X, Forsman, J.W., et Erickson, J.R. 2005. Heat sterilization times of five hardwood species. Research Paper FPL-RP-626. Madison, Wisconsin. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 10 p.**
- Sinclair, B.J. et Dillon, D. 2008. High temperature tolerance of the emerald ash borer *Agrilus planipennis*. Contrat de recherche pour l'Agence canadienne d'inspection des aliments.
- Smith, R.S., editeur. 1991. The use of heat treatment in the eradication of the pinewood nematode and its vectors in softwood lumber. Report to the Task Force on pasteurization of Softwood Lumber. Forintek Canada Corporation, Vancouver, B.C., Canada. 72 pp.**
- Snell, W.H. 1922. The effect of heat upon the mycelium of certain structural timber destroying fungi within wood. *Phytopathology* 12: 122.
- Snell, W.H. 1923. The effect of heat upon the mycelium of certain structural timber destroying fungi within wood. *Am. J. Bot.* 10: 399-411.
- Snyder, T.E. 1923. High temperatures as a remedy for *Lyctus* powder-post beetles. *J. For.* 21: 810-814.
- Sobek, S., Rajamohan, A, Dillon, D. Cumming, R.C. et Sinclair, B.J. 2011. High temperature tolerance and thermal plasticity in emerald ash borer *Agrilus planipennis*. Agricultural and Forest Entomology Article first published online: 14 Feb 2011 DOI: 10.1111/j.1461-9563.2011.00523.x**
- Sokhansanj, S., Venkatesam, V.S., Wood, H.C., Doane, J.F., et Spurr, D.T. 1992. Thermal kill of wheat midge and Hessian fly. *Postharvest Biol. Technol.* 2: 65-71.
- Sokhansanj, S., Wood, H.C., et Venkatesan, V.S. 1990. Simulation of thermal disinfestation of hay in rotary drum dryers. *Trans. ASAE* 33: 1647-1651.
- Sokhansanj, S., Wood, H.C., Whistlecraft, J.W., et Koivisto, G.A. 1993. Thermal disinfestation of hay to eliminate possible contamination with Hessian fly (*Mayetiola destructor* (Say)). *Postharvest Biol. Technol.* 3: 165-172.
- Soma, Y., Naito, H., Misumi, T., Mizobuchi, M., Tsuchiya, Y., Matsuoka, I., et Komatsu, H. 2001. Effects of some fumigants on pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* infecting wooden packages 1. Susceptibility of pine wood nematode to methyl bromide, sulfuryl fluoride and methyl isothiocyanate. Research Bulletin of the Plant Protection Service Japan 37: 19-26.**
- Srivastava, S.K. et Patel, P. N. 1970. Epidemiology of bacterial leaf spot, blight and shot-hole disease of neem in Rajasthan. Indian Phytopathology (22):237-44.**
- Stalpers, J. A. 1978. Identification of wood-inhabiting Aphyllophorales in pure culture. Studies in Mycology.**

- Suryanarayanan, T. S., Govindarajulu, M. B., Thirumalai, E., Reddy, M. S., et Money, N. P. 2011. Agni's fungi: heat-resistant spores from the Western Ghats, southern India. *Fungal Biology* 115(9): 833-838.
- Tansey, M. R. 1971. Isolation of thermophilic fungi from self-heated, industrial wood chip piles. *Mycologia* 63: 537-547.
- Taylor, A. et Lloyd, J. 2009. Phytosanitation of railway crossties with a hot borate solution immersion treatment. *For. Prod. J.* 59: 76-78.
- Tomminen, J. et Nuorteva, M. 1992. Pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* in commercial sawn wood and its control by kiln heating. *Scandinavian Journal of Forest Research* 7(1-4): 113-120.
- Tschernitz, J. L. 1991. Energy in kiln drying. *Dry kiln operator's manual: USDA Agricultural Handbook AH-188*. Forest Products Laboratory, Madison, p. 239-256.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1996. Heat treatment to control pests on imported timber, Methyl bromide alternative case study. Rep. 10 Case Studies, Volume 2.
- USDA Animal and Plant Health Protection Service. 1991. An efficacy review of control measures for potential pests of imported Soviet timber. USDA - APHIS, Rep. Misc. Publication No. 1496.
- USDA Animal and Plant Health Protection Service. 1994. Federal Register 59 7 CFR Part 319 [Docket No. 91-074-3] RIN 0579-AA47 Importation of Logs, Lumber, and Other Unmanufactured Wood Articles.
- USDA Animal and Plant Health Protection Service. 2000. Pest risk assessment for importation of solid wood packing materials into the United States: APHIS and FS. United States Department of Agriculture. 275 pp.
- USDA Forest Service. 1956. Temperatures necessary to kill fungi in wood. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Rep. Technical Note 259.
- USDA Forest Service. 1991. Pest risk assessment of the importation of larch from Siberia and the Soviet far East. USDA For. Serv. Misc. Pub. 1495.
- USDA Forest Service. 1992. Pest Risk Assessment of the importation of *Pinus radiata* and Douglas-fir logs from New Zealand. USDA For. Serv. Misc. Pub. 1508.
- USDA Forest Service. 1993. Pest risk assessment of the importation of *Pinus radiata*, *Nothofagus dombeyi* and *Laurelia philippiana* logs from Chile. USDA For. Serv. Misc. Pub. 1517.
- Uzunovic, A. et Khadempour, L. 2007. Heat disinfestation of mountain pine beetle-affected wood. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, B.C. Mountain Pine Beetle Initiative Working Paper 2007-14. 23 p.
- Uzunovic, A., Khadempour, L., et Leung, K. 2008. Heat disinfestation of decay fungi found in post-mountain pine beetle wood. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC. Mountain Pine Beetle Working Paper 2008-14. 12 p.
- Uzunovic, A., Gething, B., Coelho, A., Dale, A., J. Janowiak, J., Mack, R., et Hoover, K. 2012. Lethal temperature for pinewood nematode,

- Bursaphelenchus xylophilus*, in infested wood using radio frequency (RF) energy. *Journal of Wood Science* 59 (2): 1-11.
- Vu Thanh, T. A., Sosnowski, M. R., Giblot-Ducray, D., Taylor, C. et Scott, E. S. 2012. Effect of burning and high temperature on survival of *Xanthomonas translucens* pv. *pistaciae* in infected pistachio branches and twigs. *Plant Pathology* 61: 1082–1092.
- Wang, X. 2010. Heat sterilization of wood. General Technical Report FPL-GTR-190, US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, p. 1-13.
- Wang, Yuyan, Song Yushuang, Zang Xiuqiang, Liu Yang, Ge Minghong, et Zhao Julin. 1994. Study on the effect on fumigation on the wood infested by pine wood nematode with methyl bromide. *Forest-Research* 7: 6671-676.
- Wang, X., Bergman, R., Simpson, W. T., Verrill, S., et Mace, T. 2009. Heat-treatment options and heating times for ash firewood. General Technical Report FPL-GTR-187. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 29 p.
- Wang, X., Bergman, R. D., et Mace, T. 2010. Heat sterilization of ash (*Fraxinus* spp.) firewood: Heat-treating options, temperature monitoring and thermal verification. *Wood Material Science and Engineering* 5(2): 104-109.
- Webster, J.M . 1999. Pine wilt disease: a world wide survey. 1999. In: Proceedings of International Symposium, Tokyo, Japan, 27-28 October, 1998. Sustainability of pine forests in relation to pine wilt and decline, p. 254-260.
- Wermelinger, B. et Seifert, M. 2008. Temperature dependent reproduction of the spruce bark beetle *Ips typographus*, and analysis of the potential population growth. *Ecological Entomology* 24(1): 103-110.
- Widmer, T. 2011. Effect of temperature on survival of *Phytophthora kernoviae* oospores, sporangia, and mycelium. *New Zealand Journal of Forestry Science* 41: S15-S23.
- Wilcox, W.W. 1973. Degradation in relation to wood structure. In: Wood deterioration and its prevention by preservative treatments. Vol. 1. Degradation and protection of wood. D.D. Nicholas ed. Syracuse University Press, Syracuse NY. P. 107-148.
- Wingfield, M.J. et Blanchette, R.A. 1983. The pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in Minnesota and Wisconsin: insect associates and transmission studies. *Can. J. For. Res.* 13:1068-1076.
- Woodrow, R.J. et Grace, J.K. 1998. Field studies on the use of high temperatures to control *Cryptotermes brevis* (Isoptera: Kalotermitidae). *Sociobiology* 32: 27-49.
- Xie, B., Cheng, X., Shi, J., Zhang, Q., Dai, S., Cheng, F. X., et Luo, Y. 2009. Mechanisms of invasive population establishment and spread of pinewood nematodes in China. *Science in China Series C: Life Sciences* 52(6): 587-594.
- Yocum, G.D. et Denlinger, D.L. 1992. Prolonged thermotolerance in the flesh fly, *Sarcophaga crassipalpis*, does not require continuous expression or persistence of the 72 kDa heat-shock protein. *J. Insect Physiol.* 38: 603–609.
- Zabel, R.A., Kenderes, A.M., et Lombard, F.F. 1980. Fungi associated with decay in treated Douglas-fir transmission poles in the Northeastern United States. *For. Prod. J.* 30: 51-56.

Zheng BaoYou, Bao LiYou, Zhen Yi, et Xin GuoGen . 2001. Effect of heat treatment on vigor of *Monochamus alternatus*. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology 21 (1)