

DÉSENDURCISSEMENT, GELS PRINTANIERS ET
DOMMAGES AUX SEMIS DE CONIFERES

par

Francine BIGRAS
Centre de foresterie des Laurentides
Service canadien des forêts

Troisième atelier québécois sur la culture des plants forestiers en récipients, organisé à Chicoutimi par le Service du transfert de technologie du ministère de l'Énergie et des Ressources (Forêts) et le Groupe de recherche en productivité végétale de l'Université du Québec à Chicoutimi, les 9 et 10 novembre 1988

INTRODUCTION

Le gel printanier provoque des pertes importantes aux semis forestiers durant leur période de culture en pépinière. Selon la Fédération des Producteurs de Bois du Québec, trois pépinières importantes du Québec n'avaient atteint qu'entre 37 et 72% de leur objectif de livraison en 1987 à la suite des gels; on ne précise pas cependant s'il s'agit de gels de printemps ou d'automne. Par ailleurs, Tétreault et Stein (1988) ont estimé que les pertes résultant du gel printanier de 1986 s'élevaient à 5,9 millions de plants et que les avances monétaires laissées aux producteurs totalisaient \$427 500,00. Le secteur de la foresterie n'est toutefois pas le seul à subir des pertes par le gel au Québec. En effet, les secteurs de l'horticulture ornementale, maraîchère et fruitière subissent périodiquement les effets de ces gels dévastateurs. Les gelées printanières pouvant entraîner des pertes importantes ne sont pas un phénomène occasionnel, elles constituent une menace quasi-permanente (Gautier 1983). Les dernières gelées printanières surviennent à un moment où la plante est à un stade très sensible au froid soit pendant l'émergence, la floraison ou au début de la croissance végétative (Sakai et Larcher 1987). Selon Matuszkiewicz (1977) (cité dans Sakai et Larcher (1987), dans les climats tempérés, c'est le gel printanier qui constitue la plus importante menace en comparaison avec les gels survenant à d'autres périodes. Le gel printanier joue donc un rôle décisif dans la distribution des plantes herbacées et ligneuses.

Dans le passé, les travaux du CFL ont porté principalement sur le gel d'automne (D'Aoust et Cameron 1984) mais devant l'importance du gel printanier rencontré au Québec, nos études touchent maintenant à l'acclimatation d'automne, à l'hivernement et au gel printanier.

En relation avec la tolérance au gel, le conifère idéal, autant pour la production que pour le reboisement, posséderait les qualités suivantes:

(a) il deviendrait dormant et tolérant au froid avant que les températures froides de l'automne ne viennent l'endommager; (b) il poursuivrait son durcissement (tolérance au gel) jusqu'à un point où il ne subirait pas de dégâts dans son habitat naturel; (c) il posséderait une période de dormance suffisamment longue pour prévenir la croissance durant les dégels de fin d'hiver; (d) il demeurerait dormant et tolérant au froid jusqu'à ce que tout danger de gel printanier soit passé; (e) il conserverait une croissance annuelle suffisante (adapté de Howell et Dennis 1981).

Toutefois, des conifères possédant toutes ces caractéristiques n'existent pas et il s'avère alors nécessaire de tenter de protéger les arbres en culture contre les gels printaniers. Ainsi, il devient de première importance d'identifier les facteurs qui influencent la perte de l'endurcissement (désendurcissement) et d'étudier les possibilités d'intervenir au niveau de la conduite de la culture.

RYTHME DE CROISSANCE ANNUEL

La connaissance du rythme de croissance annuel des plantes ligneuses devient essentielle si l'on désire protéger ces végétaux des gels printaniers. Le cycle annuel de croissance des semis de conifères est simple: il commence par la germination de la graine et se poursuit par une période de croissance végétative suivie par la formation des bourgeons, l'entrée en dormance, ainsi que l'acquisition de la tolérance au gel, et la période de dormance. Pour les conifères, le stade juvénile (immaturité sexuelle) se poursuit pendant plusieurs années; durant la période passée en pépinière le plant de conifère est toujours dans sa phase juvénile. Si le plant a survécu au premier hiver, le cycle du plant débute par le gonflement et l'ouverture des bourgeons, suivis des autres stades de croissance végétative. Au moment de la maturité, le cycle se modifie pour inclure une période de production des structures reproductrices. Au cours du cycle annuel, la tolérance au gel varie grandement (figure 1). Par son état avancé de déshydratation, la graine est très résistante au gel. Lors de la germination, celle-ci devient plus sensible au gel. Au stade cotylédon et plantule, la tolérance au gel diminue pour se situer à son plus bas durant toute la période de croissance végétative. A la suite de l'influence des photopériodes courtes et des basses températures de l'automne, le semis s'acclimate progressivement pour atteindre son point maximal de tolérance au gel aux environs de décembre. Tôt au printemps, probablement même avant le gonflement des bourgeons, il y a progressivement perte de l'endurcissement; c'est à ce moment que la plante devient susceptible aux gels printaniers.

LE GEL

Pour bien comprendre le phénomène de gel et pouvoir protéger les plants contre les gelées, il importe de prendre en considération les différents types de gelées rencontrées sur le terrain.

Types de gelées

On reconnaît trois types de gelées: les gelées radiatives (ou par rayonnement), les gelées par advection et les gelées par évaporation.

Gelées radiatives

Tout corps solide, liquide ou gazeux émet en permanence un rayonnement calorifique, c'est-à-dire qu'il perd de sa chaleur au profit du milieu ambiant. En cas de couverture nuageuse, le rayonnement du sol et du tapis végétal est intercepté par les gouttelettes d'eau qui forment les nuages. Ces gouttelettes se réchauffent en conséquence et rayonnent ainsi passablement d'énergie calorifique vers la terre, vers les plantes. Il y a donc un échange constant de chaleur qui s'effectue sans pertes notables vers l'extérieur, c'est-à-dire vers le ciel, vers l'infini. Au contraire, si le ciel est clair, seule une partie très faible du rayonnement du sol et du tapis végétal est interceptée par l'atmosphère, c'est-à-dire par une masse gazeuse qui n'absorbe que peu le rayonnement et ne rayonne que faiblement elle-même. Par conséquent, le rayonnement émis par le sol et le tapis végétal est pratiquement perdu. De ce fait, les corps se refroidissent rapidement pendant les nuits claires ce qui conduit souvent à des dégâts de gel (figure 2). Dans le cas d'un gel par rayonnement les plantes sont plus froides que l'air (Primault 1975). Lorsqu'il y a gelée par rayonnement il se

produit une inversion thermique, l'air près du sol est plus froid que celui en hauteur (figure 3).

Gelées par advection

Les gelées par advection surviennent à l'arrivée de masses d'air à basses températures accompagnées de forts vents qui peuvent refroidir les plantes au-dessous d'un seuil critique. Pour cela, il faut que les masses d'air aient une température de quelques degrés inférieure à la résistance naturelle de la plante. Il n'y a dans ce cas aucune formation d'inversion de température. Dans le cas d'un tel gel, la température de l'air est plus basse que celle des végétaux.

Gelées par évaporation

Quant aux gelées par évaporation, elle se produisent si les organes des végétaux ont une température légèrement supérieure au point létal et qu'ils sont recouverts d'une pellicule d'eau. Si l'humidité de l'air est faible, l'évaporation de l'eau soustrait de l'énergie à la plante et entraîne le refroidissement de celle-ci (Rosenberg 1983). En effet, pour évaporer 1 g d'eau il faut 600 calories environ. Il n'est pas rare de voir geler des plantes, bien que la température de l'air soit nettement supérieure à zéro degré et que leur résistance naturelle soit située à un ou même quelques degrés au-dessous du point de congélation. Les phénomènes de gel par évaporation sont très brusques et les dégâts peuvent survenir en quelques minutes seulement (Priaumont 1975).

Dans la réalité, les différentes causes de refroidissement (advection, rayonnement, évaporation) interviennent en cumulant plus ou moins leurs effets pour provoquer le

gel des végétaux (Gautier 1983).

Les gelées se classifient également selon leur intensité. Les gelées meurtrières sont les plus sévères et provoquent la mort d'une bonne partie de la végétation (Villeneuve 1966). Une gelée blanche est moins sévère; elle résulte de la sublimation de la vapeur d'eau de l'air, sous forme de cristaux de glace sur les végétaux dont la température est inférieure à 0°C. Ce type de gel tend à isoler la plante d'un froid plus intense, en libérant de la chaleur latente en faveur des tissus végétaux (Villeneuve 1980). Si l'air est sec, cependant, il n'y a pas de dépôt de cristaux de glace à la surface des plantes; une gelée sèche est alors possible si le refroidissement est suffisant. Dans ce cas, s'il y a gel interne des tissus, on a une gelée noire (Villeneuve 1980).

Effets du gel sur les végétaux

Les plantes évitent ou tolèrent le gel. Plusieurs plantes ligneuses peuvent éviter le gel par le mécanisme de la surfusion profonde (deep supercooling) mais ce mécanisme n'est pas présent pour les conifères de nos régions. Les plantes peuvent également tolérer le gel en utilisant des mécanismes de tolérance au gel intracellulaire ou extracellulaire. Le gel extracellulaire est le mécanisme de tolérance utilisé dans le cas des conifères. A l'automne, sous l'influence des photopériodes courtes et des températures froides, l'eau gèle d'abord entre les cellules des plantes (concentration moins élevée en solutés). Par la suite, l'eau de l'intérieur de la cellule sort des cellules (par différence de pression de vapeur d'eau) et gèle à son tour. Par ce mécanisme, les plantes peuvent tolérer des températures extrêmement froides. La différence de tolérance

que l'on rencontre chez les différentes espèces réside dans leur tolérance à la déshydratation. En effet, certaines espèces peuvent tolérer que toute l'eau soit gelée à l'extérieur des cellules tandis que d'autres meurent si leur degré de déshydratation dépasse un certain point. Les gels d'automne causent des dommages si la plante n'a pas encore atteint un degré de tolérance suffisant. Le gel intracellulaire, quant à lui, est toujours mortel, il se produit rarement dans la nature à l'exception peut-être justement des gels printaniers qui surviennent après la reprise de la végétation. A ce moment la température chute très rapidement l'eau ne peut se retirer des cellules et le gel se produit à l'intérieur de celles-ci provoquant des altérations irréversibles à la cellule (Levitt 1980). Cependant, si le gel survient avant la reprise de la végétation, le gel endommage des tissus qui ont alors perdu, par le mécanisme de désendurcissement, un certain degré de tolérance au gel, ils sont par conséquent moins résistants à des températures aussi basses. Les dégâts ne sont pas causés, dans ce cas, par le gel intracellulaire.

Les gelées printanières au Québec

On pourrait définir un gel printanier de la façon suivante: des températures égales ou inférieures à 0°C qui surviennent au printemps provoquant le gel des végétaux. De plus, le gel doit survenir avant le 15 juillet; après cette date, les gelées sont considérées des gelées d'automne.

Le volume 6 sur le gel du Programme climatologique canadien (1982) est une bonne source d'information pour connaître les caractéristiques des températures de printemps. On y

retrouve, pour les différentes stations météorologiques du Québec, les moyennes et extrêmes de la date de la dernière gelée de printemps et de la première gelée d'automne ainsi que la période sans gel, les probabilités de gelées de printemps et les probabilités de période sans gel. Dans les stations, on mesure la température de l'air à l'aide de thermomètres placés dans un abri de bois à volets d'aération. L'abri est placé à une hauteur de 1,5 m du sol. Les températures enregistrées fournissent une excellente information quant aux risques de gel pour des végétaux élevés tels que les pommiers par exemple. Cependant, les températures observées juste au-dessus d'une surface gazonnée donnent une meilleure indication des températures auxquelles sont exposées les cultures basses telles que les semis forestiers. Malheureusement, on enregistre les températures minimales au-dessus d'une surface gazonnée seulement dans quelques rares stations au Canada (Programme climatologique canadien 1982). Pour cette raison, Audet (1988) vient de terminer une étude sur les écarts entre les températures sous abri et au sol. Il a observé que les écarts entre la température minimale sous abri et celle mesurée dans l'herbe à 34 stations climatologiques du Québec méridional, entre 1977 et 1984, varient de 1,5 à 4,4°C selon la station. Pendant cette période, la saison sans gel moyenne au sol a été en général de un à deux mois plus courte que celle observée sous abri.

Ainsi, l'importance des différences de températures minimales et des durées des saisons sans gel entre l'abri météorologique et le gazon démontre le manque de représentativité des risques de gel au niveau de l'abri pour les cultures basses (Audet 1988). On comprend encore

mieux l'importance de l'observation de la température minimale au niveau du gazon lorsque l'on sait que les producteurs de tabac de la région de L'Assomption ont subi des pertes de plus d'un million de dollars en raison d'un gel hâtif au sol le 31 août 1965 (Perrier 1967). A ce moment, la température sous-abri s'était maintenue au-dessus du point de congélation (Audet 1988).

Par ailleurs, il est nécessaire pour certaines méthodes de lutte de connaître l'intensité et la durée des gels qui se produisent au printemps. Il est possible à partir des données météorologiques quotidiennes de déterminer l'intensité des gels. En examinant les données météorologiques à 8 sites du Québec sur une période de 9 ans (1979-1987), on s'aperçoit que les gelées qui surviennent après la date moyenne de la dernière gelée printanière (sous abri) sont de faible intensité (0 à -4°C). Par ailleurs, il n'existe pas, au Canada, de données sur la durée de des gels printaniers. En France, de telles informations sont disponibles. Si l'on examine la durée moyenne au printemps des températures situées au-dessous d'un certain seuil pour la région de Versailles, on se rend compte que la durée du gel diminue avec l'intensité de celui-ci (Bouchet 1965). Il est probable que la même situation existe au Québec.

Pour lutter efficacement contre les gelées printanières, il serait indispensable que chaque pépinière soit équipée d'un appareil pour enregistrer la température au-niveau du feuillage accompagné d'un système avertisseur lorsque la température chute au-dessous du seuil critique.

METHODES DE LUTTE CONTRE LES GELEES PRINTANIERES

Les dégâts de gel de printemps résultent d'un ensemble complexe de conditions et les méthodes de lutte sont basées sur des moyens qui interviennent sur quelques unes de ces conditions. Certaines méthodes cherchent à modifier le climat en agissant sur le bilan radiatif ou en apportant des calories, d'autres techniques consistent à retarder le départ de la végétation au printemps. Dans le cas des modifications climatiques, on distingue d'une part les méthodes de lutte passive qui ont pour but de modifier favorablement et de manière permanente le microclimat et d'autre part les méthodes actives qui consistent à relever la température seulement pendant la durée de la période critique (Siriez 1979) (tableau 1).

METHODES QUI MODIFIENT LE MICROCLIMAT

Les méthodes de lutte passive.

Les méthodes passives consistent à se soustraire de manière permanente au risque de gel; elles concernent essentiellement le choix de l'emplacement dans le cas d'implantations nouvelles ou de techniques culturales pour modifier le microclimat de manière continue dans un sens favorable (Bouchet 1965).

1- Le choix du site

Dans le cas d'une inversion thermique, l'air froid qui est situé au niveau du sol est plus lourd que l'air chaud situé plus haut. Quand le sol est en pente, cet air froid s'écoule le long de la pente comme un liquide. Ces vents de pente sont appelés catabatiques. Les températures les plus froides sont donc observées dans les creux dits 'trous

à gelées'. Ainsi, le microrelief contribue à accentuer les écarts de températures. De plus, l'air froid se comporte comme un liquide visqueux, il est donc retenu par les obstacles tels que mur, haie, remblai, rideau d'arbres qui peuvent s'opposer à l'écoulement de l'air froid qui submerge les cultures. Au contraire, une forme convexe contribue à diminuer le risque de gelée. Par conséquent, il importe d'éviter de s'établir en bas de pente ou dans un repli de terrain. L'orientation de la pente s'avère également importante. Une pente orientée nord est moins susceptible aux gels puisque le réchauffement printanier se fait moins rapidement que sur une pente orientée vers le sud.

2- La création d'ouvertures et les brise-vent

Pour les pépinières déjà en place, situées dans des endroits qui accumulent l'air froid, il importe de créer des ouvertures pour que l'air puisse s'écouler vers des endroits plus bas ou de détruire les structures (haie, mur) qui retiennent les masses d'air froid. En revanche, le renforcement des brise-vent est à recommander du côté amont. La télé-détection est un excellent moyen de mettre en évidence les zones à risque élevé de gel (Lévesque et al. 1979, Lemieux et al. 1986).

3- L'augmentation de la conductivité du sol

Le sol peut aussi influencer les risques de gel radiatif en agissant de concert avec les conditions climatiques. En effet, un sol qui permet une remontée de chaleur en profondeur compense en partie les pertes de chaleur dues au rayonnement terrestre et empêche une chute trop rapide de la température à la

surface. Cette compensation retarde l'établissement d'une inversion thermique et par le fait même, atténue les risques de gel radiatif (Gobeil 1987). En terme pratique, l'augmentation de la conductivité et de la diffusivité thermique du sol s'obtient en la tassant et en maintenant sa teneur en eau à une valeur optimale (Audet 1988). Par ailleurs, on évitera tout emploi de paillis au printemps puisque ces derniers réduisent les transferts de chaleur entre le sol et l'air.

Selon Siriez (1979), la combinaison des trois techniques de lutte passive peuvent augmenter de 1 à 3°C la température nocturne. Ce gain de température est par ailleurs obtenu à très peu de frais.

Les méthodes de lutte active.

Les méthodes actives consistent à relever la température seulement pendant la durée de la période critique. Cette modification est obtenue en apportant localement de la chaleur sous des formes très diverses.

4- L'emploi de brouillard ou de fumée

Durant les périodes critiques on a toujours observé que lorsque le ciel est couvert, il n'y a pas de danger de gel. L'écran naturel constitué par le nuage absorbe et réfléchit vers le bas une partie importante des rayons infrarouges émis par la surface du sol et par les plantes. Se basant sur ce phénomène, on a tenté de préserver les cultures contre le gel en créant sur celles-ci des écrans artificiels. Toutes sortes de matériaux ont été utilisés pour former ces écrans. On a d'abord fait brûler les déchets de l'agriculture (bois de taille, paille, sciure). L'industrie a également

fabriqué de nombreux types de fumi-gène sous forme de poudre à base de tourbe, charbon, naphthaline etc. On a aussi utilisé des écrans à base de chlorure d'ammonium, de zinc, d'anhydride sulfureux, d'ammoniac anhydride ou de trioxyde de soufre. Toutefois, malgré les nombreux essais, les résultats sont très décevants (Perraudin et Fellay 1975). Bouchet (1965) a pu déterminer que l'efficacité du nuage dépend à la fois de la dimension (rayon) des particules et de la quantité de produit utilisé. En ce qui concerne le premier point, il a été établi que les particules devaient avoir une dimension de l'ordre de la longueur d'onde des radiations à arrêter, c'est-à-dire de l'ordre de 10 microns. Or, il semble bien que jusqu'ici on n'ait pas réussi à réaliser des écrans protecteurs remplissant cette condition. Sous nos conditions climatiques et dans l'état actuel de nos connaissances, ce procédé n'est pas applicable.

5- Le mélange de l'air

L'efficacité de cette méthode est limitée aux gelées par rayonnement. Dans ce cas, la température près du sol est la plus basse et elle augmente avec la hauteur d'abord rapidement puis plus lentement jusqu'à un certain niveau à partir duquel la température s'abaisse à nouveau à cause de l'altitude (figure 3) (Perraudin et Fellay 1975). Cela explique pourquoi, lorsqu'il y a du vent, il n'existe pratiquement pas de danger de gel. Cette méthode consiste, à l'aide de ventilateurs ou d'hélicoptères, à mélanger l'air plus chaud des couches supérieures avec celui plus froid des couches inférieures, pour que la température de la zone à protéger se maintienne au-dessus du seuil critique. Des expériences faites aux Etats-Unis et

en Australie montrent que les gains les plus favorables ne dépassaient pas 2°C (Perraudin et Fellay 1975). Cette méthode n'est pas utilisée fréquemment.

6- Le chauffage de l'air

Cette méthode de lutte est efficace pour tous les types de gelées soit par rayonnement, advection ou évaporation et l'on cherche à compenser les pertes de chaleur que subissent les organes végétaux par le chauffage. C'est la plus ancienne méthode de lutte contre les gelées. Autrefois, on utilisait des matériaux de chauffage tels que le bois de taille (verger, vignoble), sciure de bois, déchets divers, tourbe, paille etc; ces matériaux ne sont plus utilisés maintenant. On emploie plutôt des chaufferettes et des brûleurs à essence ou propane. Toutefois, en raison de l'augmentation du prix des hydrocarbures, cette méthode n'est plus beaucoup employée.

7- Le recouvrement des plants

Cette méthode de protection contre les températures froides de fin d'automne et d'hiver est grandement utilisée dans le domaine de l'horticulture ornementale au Québec. On emploie habituellement des nappes de polystyrène (micromousse) ou des géotextiles (Rioux 1987). Toutefois, Gouin (1987) fait remarquer que l'enlèvement de ces couvertures doit se faire tôt au printemps pour éviter une reprise hâtive de la végétation sous les couvertures. Il est préférable de les enlever lorsque les plantes possèdent encore une certaine tolérance au gel. Ainsi, ces couvertures n'offrent pas de protection contre les gelées printanières tardives. Elles pourraient toutefois être utiles pour protéger les plants lors d'un avertissement de gel. A ce moment, on devra se

hâter de replacer les couvertures. En horticulture ornementale, tous les contenants sont couchés avant la mise en place des couvertures pour les protéger du poids de la couverture et de la neige. Dans le cas des semis forestiers, le couchage des plateaux s'avèrerait difficile. Il serait donc nécessaire de déposer les couvertures sur des structures solides basses. La quantité d'air sous les couvertures doit être la plus faible possible pour ne pas diminuer l'efficacité des couvertures.

8- L'aspersion continue de l'eau

Cette méthode est très utilisée dans le cas des arbres fruitiers, par exemple. Elle est basée sur le principe que l'eau en gelant dégage de la chaleur. En effet, un g d'eau dégage 80 calories en se congelant. Toutefois, toute cette énergie n'est pas transférée à la plante parce qu'une certaine partie de cette eau s'évapore lors de l'aspersion. Dans la lutte par aspersion, le principe est de maintenir sur le végétal à protéger une quantité d'eau en état constant de congélation, dans une proportion telle que la température de la plante ne descende pas au-dessous du seuil critique (Perraudin et Fellay 1975). Par ailleurs, l'aspersion doit se poursuivre aussi longtemps que dure le risque de gel. Par conséquent, d'importantes quantités d'eau sont parfois nécessaires et résultent en de fortes accumulations de glace sur les plants. Le poids de la glace cause souvent des bris mécaniques importants qui peuvent limiter l'utilisation de l'aspersion pour les jeunes plants. Par exemple, des dommages importants ont déjà été constatés à la pépinière d'East Angus lors de l'utilisation de cette technique.

METHODES QUI RETARDENT LA REPRISE DE LA VEGETATION

D'autres méthodes de lutte cherchent à retarder la reprise de la végétation au printemps. Cependant ce retard ne doit pas se prolonger trop longtemps au risque de compromettre la croissance annuelle. Avant d'examiner ces méthodes, le mécanisme du désendurcissement sera étudié. Plusieurs expériences ont démontré que la photopériode ne joue pas de rôle dans le désendurcissement. Van den Driessche (1969) à la suite d'expériences avec le sapin de Douglas (Pseudotsuga menziesii) conclut que la perte de l'endurcissement semble dépendre de la température et n'est pas influencée par la photopériode. De la même manière, Aronsón (1975) montre que le désendurcissement dépend plus de la température que de la photopériode; il ajoute que le désendurcissement est plus rapide pour le pin sylvestre (Pinus sylvestris) que pour l'épinette de Norvège (Picea abies) et que le désendurcissement est plus rapide que l'endurcissement. Greer et Stanley (1985) ont démontré pour leur part que le désendurcissement est retardé mais qu'il n'est pas empêché lorsque des plants de Pinus radiata sont exposés à des photopériodes de moins de 10 heures; aucune différence dans le temps de désendurcissement n'est observée lorsque les plants sont à des photopériodes de 10, 12 ou 14 heures à une température de 17,5 / 8,5°C (J/N). Ces auteurs remarquent que la vitesse de désendurcissement durant la phase initiale est de 0,05 °C/jour à 8°C et augmente avec l'augmentation de température pour se situer 0,30°C/jour à 17,5°C. D'autres vitesses de désendurcissement ont été rapportées pour d'autres plantes ligneuses. Cornus sericea se désendurcit de 0,8°C/jour à 5°C et entre 0,7 et 2,4°C à 20°C (Kobayashi et

al. 1983). Zehnder et Lanphear (1966) rapporte une vitesse de désendurcissement de 1,9°C/ jour à 24 / 18°C (J/N) pour le Taxus sp. pendant que Harwood (1981) mentionne 0,3°C/jour à 18 / 9°C (J/N) et 0,5°C à 21 / 21°C J/N dans le cas de Eucalyptus sp.

Ainsi, la vitesse de désendurcissement augmente avec l'augmentation de la température et, à cet égard, Owens et Molder (1977) montrent que le débourrement des bourgeons de Picea glauca est justement relié à l'accumulation de chaleur.

Basées sur ces connaissances physiologiques, on peut tenter de retarder la reprise de la végétation en empêchant la plante d'accumuler la chaleur ou bien laisser la plante accumuler la chaleur mais modifier sa physiologie pour qu'elle n'y réponde pas.

Méthodes qui empêchent l'accumulation de chaleur

9- L'utilisation de la neige artificielle

L'utilisation de la neige artificielle pour protéger les végétaux durant les froids intenses de l'hiver a montré son efficacité au Québec pour les végétaux ornementaux cultivés en contenants (Denis et al. 1987). Cependant, dans le cas de gelées printanières, la fabrication de la neige à des périodes aussi tardives que juin apparaît difficile. A ce moment, pour compenser les pertes par la fonte, il serait nécessaire de fabriquer la neige très fréquemment ce qui rendrait les coûts prohibitifs.

10- La brumisation

En s'évaporant, 1 g d'eau requiert 600 calories. Basé sur ce principe

physique, il devient possible d'utiliser une brumisation pour refroidir les végétaux (après la période de dormance) pour retarder le débourrement. De nombreuses expériences ont été effectuées, avec les arbres fruitiers. On a retardé la période de floraison de 2 à 17 jours (tableau 2). De façon générale, on applique l'eau durant le jour aussitôt que la température de l'air est au-dessus de 7°C; le système est arrêté de 20:00 à 8:00. A comparer avec l'aspersion, cette méthode offre plusieurs avantages. D'abord, elle utilise moins d'eau et peut être appliquée sur des espèces fragiles puisqu'il n'y a pas de dommages par le poids de la glace. Cependant, certains désavantages ont été observés pour les arbres fruitiers tels que la diminution du rendement, l'abscission de bourgeons et l'apparition de maladies (pourriture des collets). Dans certains cas, la tolérance au gel a été augmentée dans d'autres, diminuée. Par ailleurs, l'eau doit être appliquée chaque printemps et non seulement lorsqu'il y a danger de gel. A notre connaissance, cette technique n'a pas été utilisée dans le cas de végétaux en contenants (horticulture ou foresterie). Elle devrait être expérimentée avant d'en recommander l'emploi parce qu'il est difficile de prévoir l'effet de la brumisation sur l'incidence des maladies. De plus, l'accumulation de l'eau dans le substrat pourrait aussi provoquer des problèmes sur la physiologie des racines.

11- L'entreposage au froid

Comparé à l'hivernage extérieur, l'entreposage au froid des semis forestiers offre plusieurs avantages. D'une part, il permet de faire l'inventaire et de classer le matériel végétal à l'automne, et de réduire ainsi la charge de travail

au printemps. D'autre part, il minimise les pertes dues à la desiccation hivernale, aux gels d'hiver, aux maladies et aux rongeurs qui surviennent lors de l'hivernage à l'extérieur. De plus, il diminue les risques de gels printaniers en permettant de conserver la tolérance au gel des végétaux jusqu'à la sortie des entrepôts (Colombo et Racey 1988). De plus, cette technique permettrait de passer directement des serres (ou des tunnels) de production à l'entrepôt une fois le matériel endurci. C'est, à notre avis, la meilleure protection contre les gels printaniers. Cependant, le coût de construction de ces entrepôts est très élevé et plusieurs mises au point sont nécessaires.

Méthodes qui modifient la physiologie

Les méthodes qui tentent de contrebalancer l'influence de l'accumulation de la chaleur impliquent des modifications physiologiques qui feraient de telle sorte que la plante ne répondrait pas à cette accumulation.

12- L'amélioration génétique

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, le conifère idéal n'existe pas encore. Aucun ne présente toutes les caractéristiques nécessaires et celle, entre autre, de retarder la reprise de la végétation jusqu'à ce que tout risque de gel printanier soit passé. Par ailleurs, le choix des provenances revêt une importance particulière lorsqu'il s'agit de protéger les plants des gels de printemps ou d'automne. Une étude faite par Logan et Pollard (1975) a montré que sur 6 provenances d'épinette blanche de l'Ontario (de 44° à 55° de latitude), la provenance de la latitude 45.73° (Beachburg) était beaucoup

plus vulnérable aux gelées printannières.

13- Les régulateurs de croissance

Bien des efforts ont, de tous temps, été faits pour retarder la reprise printanière de la végétation à l'aide de produits chimiques. Depuis une vingtaine d'années, les régulateurs de croissance ont attiré l'attention des chercheurs. Howell et Dennis (1981), dans une revue de la littérature, sur l'influence des régulateurs de croissance sur la croissance printanière montrent que plusieurs d'entre eux sont efficaces (Tableau 3). En effet, l'application d'auxines est depuis longtemps reconnue pour retarder la reprise printanière. Toutefois, nous savons maintenant, que des concentrations élevées en auxine induisent la production d'éthylène, lequel a un effet inhibiteur sur le développement. On a aussi remarqué que l'application de gibberellines a un effet d'inhibiteur sur le développement printanier contrairement à ce que l'on pouvait prévoir. En effet, cette hormone a normalement une action promotrice sur la croissance. Elle provoquerait cependant un retard dans la maturation des tissus ce qui pourrait retarder le développement au printemps. L'acide abscissique, quant à elle, s'avérait prometteuse mais les résultats ont été très décevants. On a réussi à obtenir un délai que chez quelques espèces. De nombreux autres produits (hydrazide maléique, cycocel, glycerol, propylène glycol, etc) ont été expérimentés avec des résultats plus ou moins variables. Toutefois, à date, aucun de ces produits n'a été utilisé commercialement à l'exception de l'éthephon (pêcher et cerisier). A première vue prometteurs, la plupart de ces produits causent des effets secondaires tels qu'une diminution de la floraison

et de la nouaison chez les arbres fruitiers.

14- Teneur en éléments minéraux et en réserves carbonées

Benzian et al. (1974) ont montré qu'une fertilisation azotée appliquée à l'automne augmentait la teneur en azote des tissus à l'automne et entraînait une reprise plus hâtive de la végétation au printemps suivant pour Picea sitchensis, Picea abies, Tsuga heterophylla et Pinus contorta. Par ailleurs, une fertilisation automnale appliquée au Juniperus chinensis (Bigras et al. 1988) a augmenté la teneur en amidon et en sucres dans les racines. Ainsi, des réserves élevées en éléments minéraux et en composés carbonés seraient susceptibles de provoquer une reprise plus hâtive de la végétation. Pour retarder le départ de la végétation, il serait alors souhaitable de ne pas apporter une fertilisation dite de luxe.

CONCLUSION

L'entreposage au froid semble être le moyen le plus sûr de se protéger contre les gelées d'automne et de printemps et pour minimiser les problèmes d'hivernement. Cependant, en l'absence d'entrepôts, l'aménagement du site des pépinières est la première mesure à prendre pour lutter contre les gelées. Ensuite, l'emploi de couvertures hivernales semblent offrir le meilleur moyen de protection puisque l'aspersion des plants, le mélange et le chauffage de l'air ne s'avèrent pas applicables dans toutes les situations. Par ailleurs, l'emploi des régulateurs de croissance ou la brumisation nous apparaît intéressants. Il est cependant impossible d'en recommander l'utilisation avant que la recherche ne se soit penchée sur ces méthodes.

REFERENCES

- Aronson, A. 1975. Influence of photo- and thermoperiod on the initial stages of frost hardening and dehardening of phytotron-grown seedlings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Stud. For. Suec.* 128:1-20.
- Audet, R. 1988. Risques et prévisions de gel au sol. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec. 90 pp.
- Benzian, B., R.M. Brown et S.C.R. Freeman. 1974. Effect of late-season top-dressings on N (and K) applied to conifer transplants in the nursery on their survival and growth on British forest sites. *Forestry (Oxf.)* 47:153-184.
- Bigras, F., J.-A. Rioux, R. Paquin et H.-P. Therrien. 1988. (soumis). Influence de la date d'arrêt des fertilisations sur la croissance, la tolérance au gel et la teneur en éléments minéraux et en réserves carbonées des rameaux et des racines de genévrier (*Juniperus chinensis* L. 'Pfitzerana Aurea'). *Can. J. Plant Sci.*
- Bouchet, R.J. 1965. Problèmes de gelées de printemps. *Agr. Meteorol.* 2: 167-195.
- Colombo, S.J. et G.D. Racey. 1988. Overwinter storage of nursery stock. p.34-38. *In* C.R. Smith and R.J. Reffle. Talking stock: the role of nursery practice in forest renewal. *Can. For. Serv., Sault Ste-Marie, Ont. OFRC Sump. Proc.* O-P-16.
- D'Acoust, A.L. et S.I. Cameron. 1982. The effect of dormancy induction, low temperatures and moisture stress on cold hardening of containerized black spruce seedlings. p. 153-161. *In* J.B. Scarrat, C. Glerum and C.A. Plexman (eds) *Proc. Canadian Containerized Tree Seedling Symposium. Environ. Can., Can. For. Serv., Great Lakes Forest Research Center, Sault Ste Marie, Ont.*
- Denis, R., R. Boily et R. Thériault. 1987. Hivernage des plants en pépinière pp.78-86. *In* Colloque sur l'horticulture ornementale. Hivernage des plantes de pépinière. Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation. Gouvernement du Québec.
- Gautier, M. 1983. La lutte contre les gelées printanières. *Arboriculture fruitière* 348 (février):37-44.
- Gobeil, A. 1987. Protection des bleuétiers sauvages contre le gel printanier. Séminaire en phytologie. Département de phytologie. Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation. Université Laval, Québec. 52 pp.
- Gouin, F.R. 1987. Les protections hivernales: description, coûts, avantages et inconvénients. p. 19-25. *In* Colloque sur l'horticulture ornementale. Hivernage des plantes de pépinière. Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation. Gouvernement du Québec.

- Greer, D.H. et C.J. Stanley. 1985. Regulation of the loss of frost hardiness in Pinus radiata by photoperiod and temperature. *Plant, Cell and Environm.* 8:111-116.
- Harwood, C.E. 1981. Frost resistance of subalpine Eucalyptus species. II. Experiments using the resistance index method of damage assessment. *Austr. J. Bot.* 29: 209-218.
- Howell, G.S. et F.G. Dennis, Jr. 1981. Cultural management of perennial plants to maximize resistance to cold stress. In Olien, C.R. and M.N. Smith. Analysis and improvement of plant cold hardiness. CRC Press, Boca Raton, Florida. p.175-204.
- Kobayashi, K.D., L.H. Fuchigami et C.J. Weiser. 1983. Modeling cold hardiness of red-osier dogwood. *J. Amer. Soc. Hortic. Sci.* 108: 376-381.
- Lemieux, G.H., R. Verrault, S. Perron, G. Vachon et M. Labonté. 1986. La télédétection thermographique et anémométrique dans la bleuétière de Saint-Nazaire. *Vaccinia* 12. Université du Québec, Chicoutimi. 16 pp.
- Lévesque, J., F. Bonn et J.-J. Boisvert. 1979. Thermographie nocturne: microclimat et probabilité de gel. Département de géographie. Laboratoire de télédétection. Université de Sherbrooke. 56 pp.
- Levitt, J. 1980. Responses of plants to environmental stresses. Vol.1. Chilling, freezing, and high temperature stresses. 2^e ed. Academic Press, N.Y. 497 pp.
- Logan, K.T. et D.F.W. Pollard. 1975. Testing resistance to spring frosts by white spruce provenances. *Envir. Canada., Forestry service.* Bi-monthly research notes 31:6-7.
- Matuszkiewicz, W. 1977. Spät- und frühfröste als standortsökologischer faktor in den waldegellschaften des Bialowieza Nationalparks (Polen). p. 195-233. In H. Dierschke (ed.) *Vegetation und Klima.* Cramer, Vaduz.
- Owens, J.N., M. Molder et H. Langer. 1977. Bud development in Picea glauca. I. Annual growth cycle of vegetative buds and shoot elongation as they relate to date and temperature sums. *Can. J. Bot.* 55: 2728-2745.
- Perraudin, G. et D. Fellay. 1975. Les moyens de lutte. *Revue suisse de viticulture, arboriculture, horticulture.* Numéro spécial: gel. 7 (avril):31-55.
- Perrier, R. 1967. Probabilités de gel au Québec. *Bull.* 23. Service de la météorologie. Ministère des richesses naturelles. Québec. 130 pp.
- Primault, B. 1975. Considérations météorologiques sur le gel. *Revue suisse de viticulture, arboriculture et horticulture,* numéro spécial: gel, vol.7: 9-11.
- Programme Climatologique Canadien. 1982. Normales climatiques au Canada 1951-1980. Vol.6: gel. *Environnement Canada.* Service de l'environnement atmosphérique. Gouv. du Canada. 276 pp.

- Rioux, J.-A. 1987. Evaluation de quelques protections hivernales pour la production en pépinière au Québec. p.56-61. In Colloque sur l'horticulture ornementale. Hivernage des plantes de pépinière. Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation. Gouvernement du Québec.
- Rosenberg, N.J., B.L. Blad et S.B. Verna. 1983. Microclimate, the biological environment. Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons, N.Y. 495 pp.
- Sakai, A. et W. Larcher. 1987. Frost survival of plants. Responses and adaptation to freezing stress. Springer-Verlag, Berlin. 321 pp.
- Siriez, H. 1979. La lutte contre les gelées. Phytoma 309 (mars):21-27.
- Tétrault, J.-P. et A. Stein. 1988. Cime multiple et production de plants en récipients. Rapport daté du 1988-09-14 du Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la régénération forestière, Gouvernement du Québec.
- Van den Driessche, R. 1969. Influence of moisture supply, temperature, and light on frost-hardiness changes in Douglas fir seedlings. Can. J. Bot. 47: 1765-1772.
- Villeneuve, G.-O. 1966. Ecart entre la température minimum dans l'herbe et la température minimum sous abri. Bull. MP-5. Service de météorologie, Ministère des Richesses Naturelles. Gouvernement du Québec. 29 pp.
- Villeneuve, G.-O. 1980. Glossaire de météorologie et de climatologie. 2^e édition. Les Presses de l'Université Laval. Québec. 645 pp.
- Zehnder, L. et F.O. Lanphear. 1966. The influence of temperature and light on the cold hardiness of Taxus cuspidata. Proc. Amer. Soc. Hortic. Sci. 89: 706-713.

Tableau 1 . Méthodes de lutte contre les gelées de printemps

METHODES QUI MODIFIENT LE MICROCLIMAT

Lutte passive

- 1- le choix du site
- 2- la création d'ouvertures et les brise-vent
- 3- l'augmentation de la conductivité du sol

Lutte active

- 4- l'emploi de brouillard ou de fumée
- 5- le mélange de l'air
- 6- le chauffage de l'air
- 7- le recouvrement des plants
- 8- l'aspersion continue de l'eau

METHODES QUI RETARDENT LA REPRISE DE LA VEGETATION

Méthodes qui empêchent l'accumulation de chaleur

- 9- l'utilisation de la neige artificielle
- 10- la brumisation
- 11- l'entreposage au froid

Méthodes qui modifient la physiologie

- 12- l'amélioration génétique
 - 13- les régulateurs de croissance
 - 14- teneur en éléments minéraux et en réserves carbonées
-

Tableau 2. Influence de la brumisation sur le débourrement

Espèce	Cultivar	Endroit	Délai de floraison (jours)
Pommier	Délicieuse	Utah	17
	Del., Jonathan	Idaho	13
	McIntosh	B.C.	17
	Golden Del.	Ohio	9
	Del., Idared	New York	4-7
	Del., Jonathan	Michigan	6
Poirier	Bartlett, Bosc	Georgie	14
	Redhaven	Kentucky	15
	Dixie Red	Texas	15
	Belle de Georgie	Ohio	5
	Sungold	Floride	10-14
Cerisier	Hedelfingen	Michigan	2-6
	Montmorency	Michigan	3
Vigne	SV5276	Michigan	3
		Italie	7

Tiré de Howell et Dennis 1981

Tableau 3. Influence des régulateurs de croissance sur le développement printanier

Produit	Espèce	Délai (jours)
ANA	pêcher	14, 0, 2, 11
	vigne	14-21
	pommier, poirier, cerisier, prunier, lilas	14
Ethephon	pommier	0
	cerisier	5, 5, 5, 0
	pêcher, prunier	3
	amandier	5-6
GA ₃ , KGA	cerisier	21
	amandier	7
	boutures de vigne	17
	pêcher	0-7, 5, 10-14, 10-11
	pommier, cerisier, prunier, pêcher	0
ABA	caféier (serre)	120
	cerisier	0
	pamplemoussier (serre)	7-9
	rosier, forsythie, cornouillier	0
	frêne	27
	conifères	3

Tiré de Howell et Dennis 1981

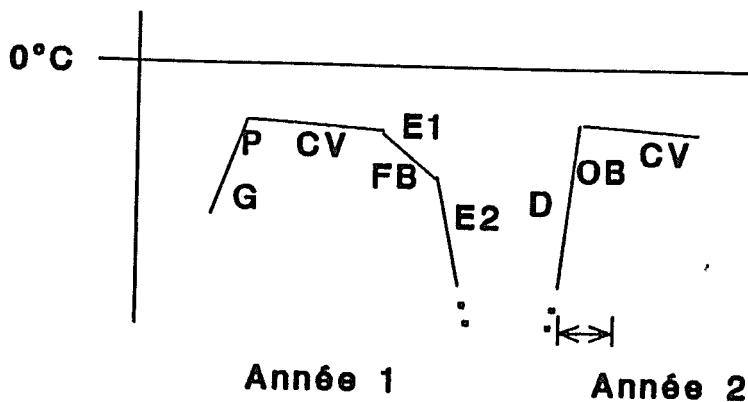


Figure 1. Tolérance au gel en fonction des stades de développement.

CV: croissance végétative;

FB, OB: formation , ouverture des bourgeons;

E1, E2: stades d'endurcissement 1 et 2;

D: désendurcissement;

G: germination; P: plantule

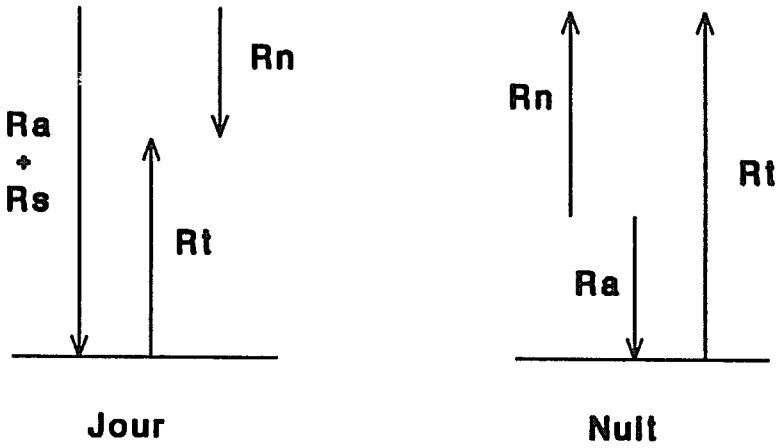


Figure 2. Bilan des échanges d'énergie

R_a : rayonnement atmosphérique

R_s : rayonnement solaire

R_t : rayonnement terrestre

R_n : rayonnement net

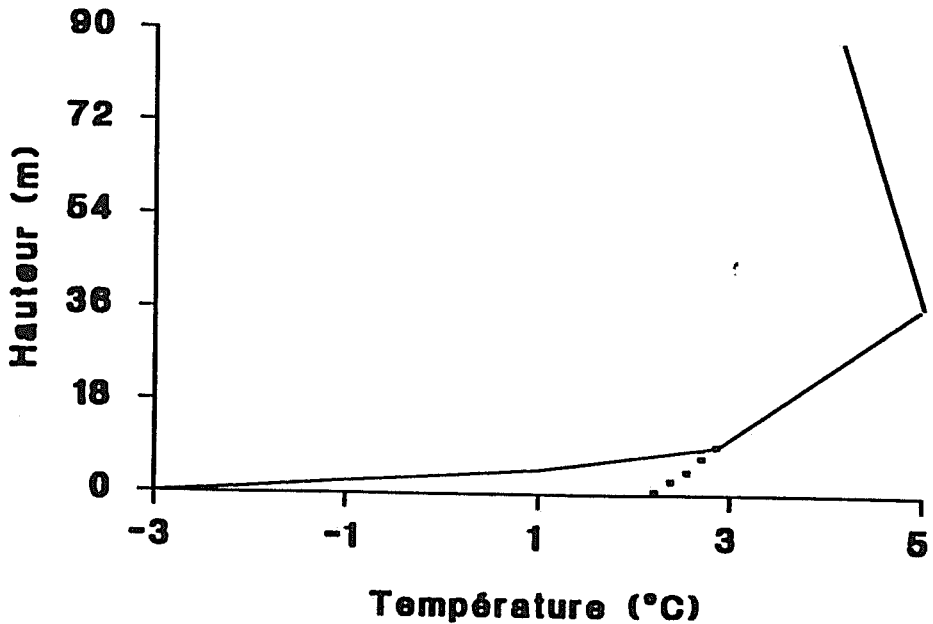
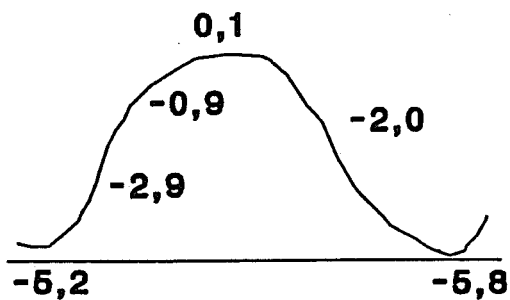
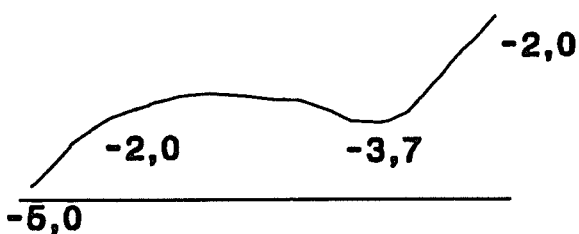


Figure 3. Répartition de la température en hauteur durant une nuit de gel par rayonnement avant (—) et après (· · · ·) ventilation. (Perraudin et Fellay 1975)



H: 15 m
D: 500 m



H: 15 m
D: 580 m

Figure 4. Variations des températures minimales en fonction du relief (1 avril 1949) (Bouchet 1965)