

## Paramètres affectant le débit d'air à travers une masse de poireaux et leur taux de refroidissement

Clément Vigneault  
Bernard Goyette

Centre de recherche et développement en horticulture,  
Agriculture et agroalimentaire Canada,  
430, boulevard. Gouin,  
St-Jean-sur-Richelieu (Québec),  
Canada, J3B 3E6  
<vigneaultc@agr.gc.ca>  
<goyetteb@agr.gc.ca>

### Résumé

Des essais ont été réalisés pour déterminer les possibilités d'utiliser la ventilation et les paramètres affectant la circulation de l'air et le taux de refroidissement de poireaux. Deux types de contenant, trois densités d'emballage et trois pertes de pression statique à travers les contenants ont été comparés. Les débits d'air obtenus, les taux moyens de refroidissement et leur uniformité à travers la masse du produit ont été mesurés. Les résultats ont montré que le type de contenant et la densité d'emballage n'ont pas d'effet sur le débit d'air à l'intérieur des valeurs testées. En revanche, des pressions statiques supérieures à 12 mm d'eau ont un effet marqué autant sur les débits d'air que sur le taux de refroidissement et son uniformité à travers la masse de produit.

**Mots clés :** Productions végétales ; Méthodes et outils ; Technologie, récolte et transport.

### Abstract

#### Parameters affecting airflow through leeks and their cooling rate

Trials have been made to determine the possibilities of using forced-air cooling as well as the parameters affecting airflow through leeks and their cooling rate. Two container types, three packing densities and three static pressure drops were compared. Airflow rates, mean cooling rates and their uniformity across the mass of produce were measured. The results showed that container types and packing density had no effect on airflow rate within the range of tested values. However, static pressure drops above 12 mm have an important effect on the airflow rate as well as the cooling rates and their uniformity through the mass of produce.

**Key words:** Vegetal productions; Tools and methods; Technology, crop and transportation.

Le poireau est un légume relativement facile à conserver lorsqu'il est traité adéquatement et prérefroidi immédiatement après la récolte [1]. N'étant pas un produit climatérique, il peut être récolté aussitôt qu'il a atteint une grosseur commercialisable ou, plus tard, lorsque sa masse commercialisable a augmenté; mais le prix est alors généralement plus bas. Dans les régions froides, le prix du poireau augmente après la fin de la saison de croissance. Le poireau atteint alors une valeur commerciale des plus intéressantes. Seule la diminution de la qualité du poireau limite sa durée de commercialisation. Il est donc très impor-

tant de développer des moyens de conservation de la qualité qui soient à la fois efficaces et peu coûteux.

La ventilation froide est le moyen le plus économique pour prérefroidir les produits horticoles. De plus, l'air forcé est reconnu pour refroidir les produits horticoles de quatre à dix fois plus rapidement qu'un refroidissement en chambre froide [2].

L'objectif principal de cette recherche est de déterminer les possibilités d'utiliser l'air forcé et ses conditions d'utilisation qui garantissent un refroidissement rapide et uniforme du poireau.

Tirés à part : C. Vigneault

## Revue de la littérature

### Données biologiques sur la conservation du poireau par le froid

Le poireau respire et produit huit fois plus de chaleur à 21 °C qu'à 0 °C [3]. Le poireau jaunit rapidement, s'allonge et, s'il est entreposé horizontalement, a tendance à se déformer ou se courber à des températures comprises entre 10 °C et 21 °C [4]. De plus, si le refroidissement n'est pas réalisé correctement, les poireaux au centre d'une boîte-palette se réchauffent, ce qui facilite le développement de *Botrytis porri*, principal agent pathogène responsable de la détérioration du poireau [5]. Selon l'*Oregon State University* (OSU) [6], s'il est bien traité, le poireau peut être entreposé pour une période de deux à trois mois à 0 °C sous une humidité relative de 95 à 100 %. Gariépy *et al.* [7] ont démontré que certains cultivars de poireau pouvaient être entreposés sous atmosphère contrôlée (2 % O<sub>2</sub> et 5 % CO<sub>2</sub>) pour une période de plus de 5 mois lorsqu'ils sont préalablement bien refroidis. Le poireau [4], comme le brocoli [8] et bien d'autres produits [9], doit donc être refroidi très rapidement après sa récolte pour conserver sa qualité.

Il peut être refroidi rapidement en utilisant la glace liquide ou concassée [10], l'eau froide [6] ou le refroidissement sous vide [11]. Des essais ont établi que le temps de demi-refroidissement ( $T_{1/2}$ ) du poireau se situait à près de 10,5 minutes lorsqu'il est refroidi à l'eau et à quelque 13,5 minutes dans le cas d'un refroidissement sous vide [12]. Le refroidissement à l'air forcé n'est pas recommandé pour le poireau [4, 6].

### Données technologiques sur la ventilation froide du poireau

Le problème associé à l'utilisation de l'air forcé semble être la difficulté à faire circuler uniformément l'air froid à travers la masse de poireaux emballés en boîte-palette de 1,0 sur 1,2 m de côté.

En choisissant des produits de même taille, il est possible de mesurer l'uniformité (U, minutes) de refroidissement des produits horticoles [13] dans un même contenant, car U ne devrait dépendre que de l'uniformité de répartition du fluide caloporteur à travers la masse de produit

[13]. Finalement, plus le  $T_{1/2}$  moyen et U ont des faibles valeurs, plus le système utilisé peut être considéré comme performant [14].

Mis à part les propriétés thermiques d'un produit, les principaux paramètres ayant un effet sur le taux de refroidissement et sur lesquels l'utilisateur a un certain contrôle sont le type de contenant, la surface totale d'ouverture sur les parois des contenants [2, 12, 15], la pression statique appliquée pour forcer l'air à circuler à travers le contenant et les produits [2, 16], la densité d'emballage [17, 18] et le taux de remplissage des contenants [19]. Dans les systèmes de prérefroidissement à l'air forcé, Fraser [20] recommande d'utiliser des pressions statiques de 3 à 25 mm d'eau, tout en maintenant un débit de 0,5 à 6 L d'air·s<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup> de produit. Des pressions statiques excédant les 50 mm d'eau entraînent généralement une perte d'efficacité du système en requérant des puissances excessives pour forcer l'air à passer à travers des produits. Il est donc préférable d'ajuster la densité d'emballage, les dimensions des contenants et la surface totale des ouvertures sur les parois des contenants de façon à éviter une réduction trop grande du débit d'air tout en respectant les pressions statiques maximales recommandées [21].

Les données concernant le temps de refroidissement à l'air forcé en relation avec le type de produit, la grosseur, la température initiale et finale du produit ainsi que la température de l'air utilisé ne sont pas disponibles et sont généralement déterminées par approximations successives. Cette façon d'opérer entraîne souvent des coûts d'installation élevés, car il est rare d'obtenir les conditions optimales d'utilisation lors des premiers essais. De plus, il n'est pas rare de voir des systèmes de prérefroidissement utilisés sous de mauvaises conditions d'opération ; l'installation n'ayant pas été bien faite, leur coût de remplacement par un système adéquat est, à court terme, trop élevé.

De façon générale, les produits horticoles sont refroidis après être emballés [21]. Les contenants privilégiés pour le poireau entreposé pour de longues périodes sont les boîtes-palettes de 1,0 sur 1,2 m de côté. Leurs parois latérales composées de lattes de bois donnant une ouverture de 39 % de leur surface totale permettent une ventilation par flux transversal dans un tunnel de ventilation, leur plancher n'ayant pas d'ouverture. Cette ouverture est généralement considérée comme suf-

fisamment grande pour n'avoir qu'un effet négligeable sur les pertes de pression à travers les parois des boîtes-palettes, principalement lorsque les produits qu'elles contiennent sont plutôt denses [16].

Selon plusieurs auteurs [9, 20–22], la façon générale de procéder pour le développement d'un système de refroidissement à l'air forcé consiste d'abord à mesurer le débit d'air obtenu en fonction des différentes configurations de contenants et de placement des produits dans ces derniers. À partir des meilleurs résultats obtenus tant sur le plan technique qu'économique, l'effet de la circulation d'air froid à travers la masse de produit est mesuré pour différents débits d'air. Ces résultats déterminent le *design* du système le plus prometteur.

## Matériel et méthode

### Banc d'essai

Un banc d'essai a été construit à l'intérieur d'une chambre froide pour mesurer l'effet de la pression statique sur le débit d'air passant à travers une masse de produit horticole et l'effet de la circulation de l'air sur le taux et l'uniformité de refroidissement du produit. Le banc d'essai est composé de (les numéros entre parenthèses représentent les différentes parties du système à la *figure 1*) : un plénum (1), un évaporateur (2), un système de refroidissement de 18,7 kW, un ventilateur à cage d'écureuil (3) actionné par un moteur de 11,2 kW et un retour d'air muni de rectificateurs multiples (4) facilitant la mesure du débit d'air. Une vanne (5) permet d'ajuster la quantité d'air circulant à travers la masse de produit (9) placée en face du plénum (1). L'ajustement de la vanne (5) peut être soit basé sur le débit d'air passant à travers la masse de produit mesuré à l'aide d'un tube de Pitot (7) placé dans le retour d'air et relié à un transducteur électronique permettant la prise de données en continu sur ordinateur, soit obtenu à partir de la perte de pression à travers la masse de produits fondée sur la mesure de la pression statique à l'intérieur du plénum (8) à l'aide du même transducteur électronique. Les mesures de débit d'air et de pression statique ainsi que le calibrage des appareils ont été réalisés selon les normes de l'*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*

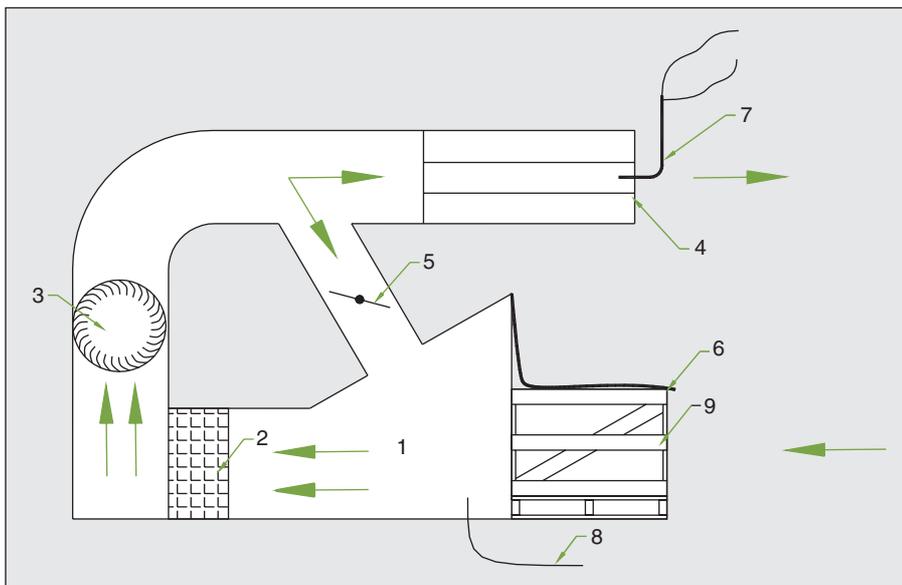
## Types de contenants et densités d'emballage

Le système de réfrigération du banc d'essai n'était pas actionné lors des mesures de l'effet de la densité d'emballage sur le débit d'air. Les produits étaient placés en face du plénum et minutieusement couverts pour minimiser toute infiltration d'air entre la toile et les parois latérales ou le dessus des contenants. Le ventilateur était ensuite mis en marche et la vanne était ajustée pour obtenir la pression statique désirée. Après une période de stabilisation de 5 minutes, le débit d'air était mesuré en continu pour une période de 5 minutes à l'aide du tube de Pitot préalablement calibré [23]. Trois pressions statiques ont été utilisées : 12, 25 et 50 mm d'eau. Deux types de contenants ont servi aux essais formant chacun une unité d'emballage, soit une boîte-palette et dix boîtes de plastique empilées sur une palette de bois. Les essais ont été réalisés en forçant l'air à circuler à travers une ou deux unités d'emballage selon le protocole expérimental et en utilisant trois densités d'emballage différentes. Les mesures ont été répétées trois fois en réajustant à chaque fois la pression statique à un des trois niveaux de façon aléatoire. Le plan expérimental correspond à un bloc incomplet de 90 essais, soit trois pressions statiques, deux types de contenants, deux types d'empilements, trois densités d'emballage (une seule densité d'emballage pour les boîtes de plastique) et trois répétitions.

### Types de contenants

- *Boîtes-palettes*. Elles étaient formées d'une base de 1 200 mm sur 1 000 mm et de parois verticales de 750 mm de haut. Le plancher surélevé à 140 mm du sol servait de support pour les produits, laissant un espace libre pour le passage des fourches d'un chariot élévateur. Le positionnement des boîtes-palettes était tel que les trois supports horizontaux situés sous le plancher surélevé étaient perpendiculaires à la direction de l'air. Les parois latérales étaient constituées de trois planches horizontales de 90 mm de large et d'une planche oblique servant de renfort (*figure 2a*) produisant ainsi une surface d'ouverture égale à 39 % de la surface de la paroi. Les poireaux étaient placés verticalement dans les boîtes-palettes, avec la partie racine vers le bas.

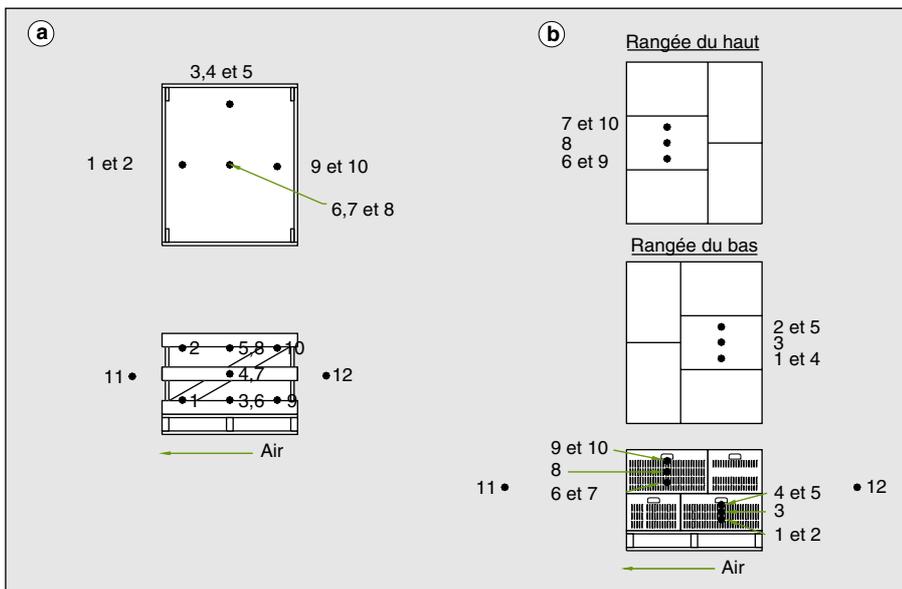
- *Contenant en plastique*. Le contenant en plastique utilisé avait été spécialement développé pour la manutention des produits horticoles [24]. Il mesurait 400 mm



**Figure 1.** Banc d'essai pour mesurer l'effet des différentes conditions de refroidissement des produits horticoles (vue de côté).

**Figure 1.** Experimental setup used to measure the effects of various cooling conditions of horticultural produce.

1 : plénum ; 2 : évaporateur ; 3 : ventilateur à cage d'écureuil ; 4 : retour d'air muni de rectificateurs multiples ; 5 : vanne ; 6 : toile étanche au passage de l'air ; 7 : tube de Pitot ; 8 : tube permettant la mesure de la pression statique ; 9 : masse de produit.



**Figure 2.** Position des thermocouples utilisés pour déterminer les performances des systèmes de refroidissement à l'air forcé avec : a) les boîtes-palettes ; b) les boîtes de plastique.

**Figure 2.** Thermocouple positions used to determine the performance of forced-air cooling systems using a) bins; b) plastic boxes.

(ASHRAE) [23]. Une toile étanche au passage de l'air (6) a été fixée sur les deux côtés et sur le haut du plénum et servait à couvrir la masse de produit laissant seulement deux faces non couvertes, soit celles qui sont parallèles à l'ouverture du

plénum. Le système fonctionne donc par aspiration de l'air qui traverse transversalement une ou deux boîtes-palettes ou palettes de profondeur, et circule en boucle fermée à l'intérieur de la chambre froide.

par 600 mm au plancher. Cinq boîtes de plastique ont été nécessaires pour couvrir la même surface de plancher qu'une boîte-palette. Trois boîtes de plastique ont été placées côte à côte faisant face à deux boîtes bout à bout (*figure 2b*) sur une palette de bois de 140 mm de haut servant de support lors du transport des produits. La position des deux boîtes bout à bout était alternée pour obtenir un empilement croisé. La hauteur de ces boîtes ne permettait qu'un empilement horizontal des poireaux. En effet, la longueur des poireaux s'ajustait parfaitement bien avec la longueur de ces boîtes mais ceux-ci devaient être placés tête à queue pour permettre un remplissage uniforme. Cinq boîtes de 280 mm et cinq autres de 343 mm ont été nécessaires pour emballer la même quantité de poireau que celle contenue dans les boîtes-palettes et ont formé la première et la deuxième rangée de boîtes, respectivement. La surface totale d'ouverture était de 25 % de la surface des parois des boîtes. Ces ouvertures étaient des fentes verticales de 3,5 mm de large et d'une longueur moyenne de 30 mm distribuées uniformément sur la surface des parois des boîtes, à l'exception d'une bande de 25 mm sans ouverture sur leur pourtour [24].

### Densités d'emballage

Trois densités d'emballage ont été utilisées avec les boîtes-palettes, soit à 100 %, 90 % et 80 % de la capacité maximale. À la récolte, les boîtes-palettes ont été remplies à pleine capacité par le producteur. Les boîtes de poireaux ont ensuite été pesées et les premiers essais ont été réalisés en considérant la densité d'emballage à son maximum. Les densités d'emballage « moyenne » et « basse » ont été obtenues en retirant respectivement environ 10 et 20 % de la masse initiale de produit un à un au hasard des poireaux de la boîte-palette. Finalement, toute la masse originale de poireaux a été transférée dans les boîtes de plastique pour y réaliser les derniers essais. Le placement des produits étant horizontal dans les boîtes de plastique, il était impossible d'obtenir une densité d'emballage inférieure à 100 % en ne remplissant que partiellement ces boîtes. Seule la densité d'emballage à 100 % a donc pu être utilisée avec ces emballages.

### Refroidissement du produit

Avant chaque essai de refroidissement, les produits utilisés ont été réchauffés à

une température comprise entre 18 et 22 °C à l'aide du système à air forcé. Selon le protocole expérimental, une ou deux palettes ou boîtes-palettes de ces produits ont ensuite été instrumentées et placées dans la chambre froide à l'entrée du prérefroidisseur à l'air forcé puis couvertes à l'aide de la toile étanche. Lorsque deux palettes de produits étaient refroidies en même temps, la position des palettes était telle que l'air devait traverser les deux palettes avant d'atteindre le refroidisseur. Le démarrage du système de réfrigération et du ventilateur marquait ainsi le début de l'essai de prérefroidissement. Pendant les essais, les températures ont été mesurées à l'aide de thermocouples de type T placés dans des poireaux et enregistrées à l'aide d'une carte d'acquisition de données (DATA shuttleMC, Strawberry TreeMC) et d'un ordinateur portable. Les poireaux instrumentés ont été choisis en fonction de leur diamètre pour minimiser la différence entre leur taux de refroidissement qui pourrait être associé à une différence de taille. Les températures ont été utilisées pour déterminer le  $T_{1/2}$  [2] en utilisant la méthode itérative développée par Goyette *et al.* [14]. L'uniformité de refroidissement,  $U$ , a été calculée comme l'écart type entre les  $T_{1/2}$  de chaque point de mesure à l'intérieur d'un même essai expérimental.  $T_{1/2}$  et  $U$  ont été utilisés pour différencier les performances des systèmes conformément à la méthode décrite par Goyette *et al.* [14].

### Air forcé en boîte-palette

Une ou deux boîtes-palettes ou palettes de boîtes de plastique ont été équipées de capteurs de température. Dix thermocouples ont été placés au centre du dia-

mètre des poireaux situés aux endroits correspondant aux chiffres de la *figure 2a*. Deux thermocouples ont été suspendus dans l'air à environ 100 mm des produits, soit un avant et un après que l'air ait été en contact avec les poireaux.

### Air forcé et boîte de plastique

Le positionnement des thermocouples et des boîtes lors des essais avec les boîtes de plastique est présenté à la *figure 2b*. Tous les thermocouples ont été placés au centre des poireaux à la base des premières feuilles et les poireaux ont été couchés dans les boîtes de plastique. La boîte centrale parmi les trois boîtes placées longitudinalement sur chaque rang a été instrumentée (*figure 2b*).

### Comparaison avec d'autres systèmes de refroidissement

Les résultats des essais de refroidissement à l'air forcé ont été comparés à ceux d'essais de refroidissement en chambre réfrigérée commerciale, à l'eau et sous vide présentés dans la littérature [12] (*tableau 1*). Cette comparaison a été réalisée en termes de durée de traitement pour atteindre 7/8 du refroidissement, soit  $T_{7/8}$  [14].

## Résultats et discussion

### Types de contenants et densités d'emballage

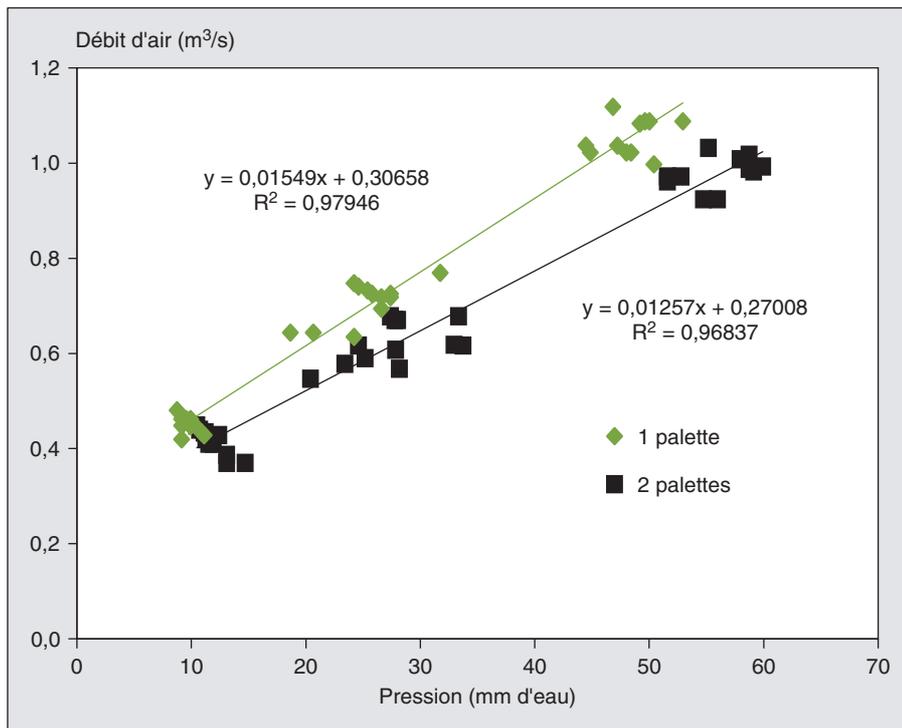
Les résultats présentés à la *figure 3* démontrent les effets du type de contenant, de la densité d'emballage et de la pression statique sur le débit d'air circulant à travers une masse de poireaux.

**Tableau 1. Temps de demi-refroidissement ( $T_{1/2}$ ) du poireau en fonction de la méthode de refroidissement et de la pression statique.**

Table 1. Half cooling time ( $T_{1/2}$ ) of leeks as a function of the cooling method and the static pressure.

Type de refroidissement	Pression mm d'eau	Masse kg	Débit m <sup>3</sup> /s	$T_{1/2}$		$T_{7/8}$ (minutes)
				Moyenne	Écart type	
(minutes)						
Air non forcé [23]	–	–	–	789,0 <sup>a</sup>	406,5	2367 <sup>a</sup>
Air forcé	12,7	264,2	0,420	45,0 <sup>b</sup>	19,2	135 <sup>b</sup>
Air forcé	25,4	255,7	0,673	31,6 <sup>c</sup>	9,6	95 <sup>c</sup>
Sous vide [23]	–	–	–	13,5 <sup>d</sup>	5,0	25 <sup>e</sup>
Eau [23]	–	–	–	10,6 <sup>d</sup>	2,2	32 <sup>d</sup>

Les résultats dans une même colonne accompagnés d'une même lettre ne sont pas significativement différents dans un intervalle de confiance de 95 %.



**Figure 3.** Débit d'air ( $y$ ,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ) obtenu en fonction de la pression statique ( $x$ , mm d'eau) en utilisant une ou deux palettes de poireaux.

**Figure 3.** Airflow rates ( $y$ ,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ) obtained as a function of the static pressure ( $x$ , mm of water) using one or two pallets of leeks.

### Types de contenants

En comparant la hauteur totale des deux types de contenants pour emballer une même quantité de produit, il s'avère que le volume total des boîtes de plastique était égal à 83 % de celui d'une boîte-palette. Cette différence est principalement due au fait que les poireaux étaient positionnés tête à queue dans les contenants de plastique alors que les fûts des poireaux reposaient tous au fond des boîtes-palettes. Toutefois, même s'il est avantageux au point de vue volume d'entreposage, l'empilement tête à queue n'est pas recommandable car il génère une contamination des tiges des poireaux par la terre contenue dans les racines des autres poireaux.

Pour une même masse de produit et des pressions identiques, les débits d'air passant à travers la masse de produit étaient de 4 % plus élevés en air pour les poireaux emballés dans les contenants de plastique que pour ceux emballés dans une boîte-palette, et ce pour toute la gamme des pressions utilisées, soit de 10 à 50 mm d'eau. Cette différence de débit d'air n'est toutefois pas statistiquement significative ( $F_{1, 35}$ ,  $P = 0,6187$ ). Une surface d'ouverture des boîtes-palettes de

39 % comparé à 25 % pour celle des boîtes plastiques n'a donc pas favorisé de façon significative une plus grande circulation de l'air. Ce résultat correspond bien à ceux de l'étude présentée par Vigneault et Goyette [16] où ils concluaient que des surfaces totales d'ouverture supérieures à 25 % de la surface d'un contenant n'avaient qu'un effet négligeable sur la circulation de l'air à travers les produits.

### Densités d'emballage

À partir des masses de poireaux dans les boîtes-palettes à leur arrivée, les valeurs nominales de densité d'emballage de 100 %, 90 % et 80 % correspondent à des masses moyennes de 238, 221 et 204 kg, respectivement. Les résultats des tests de circulation d'air démontrent que la densité d'emballage n'a pas eu d'effet significatif sur le débit d'air ( $F_{2, 34}$ ,  $P = 0,0922$ ).

### Types d'empilements

Le nombre de palettes de profondeur ( $F_{1, 34}$ ,  $P < 0,0001$ ), la pression statique ( $F_{2, 34}$ ,  $P < 0,0001$ ) et leur interaction ( $F_{2, 34}$ ,  $P < 0,0244$ ) ont eu un effet significatif sur le débit d'air circulant à travers la masse de produits. Des courbes de régression ont été calculées à partir des résultats pour déterminer l'effet de ces deux para-

mètres (figure 3). Lorsque l'air passe à travers deux palettes de poireaux au lieu d'une seule, le débit total d'air est réduit en moyenne de 15,8 %. Cette réduction est sensiblement constante ne variant que de 14,2 % à 10 mm d'eau à 16,9 % à 50 mm d'eau. En revanche, en faisant passer de un à deux le nombre de palettes à travers lesquelles l'air doit passer, on augmente la masse de produit traité et le ratio du débit d'air à la masse de poireau diminue drastiquement, soit d'environ 2,37 fois, passant de 1,94 à 0,83 L d'air. $s^{-1} \cdot kg^{-1}$  et 4,54 à 1,89 L d'air. $s^{-1} \cdot kg^{-1}$  pour des pressions de 10 et 50 mm d'eau, respectivement.

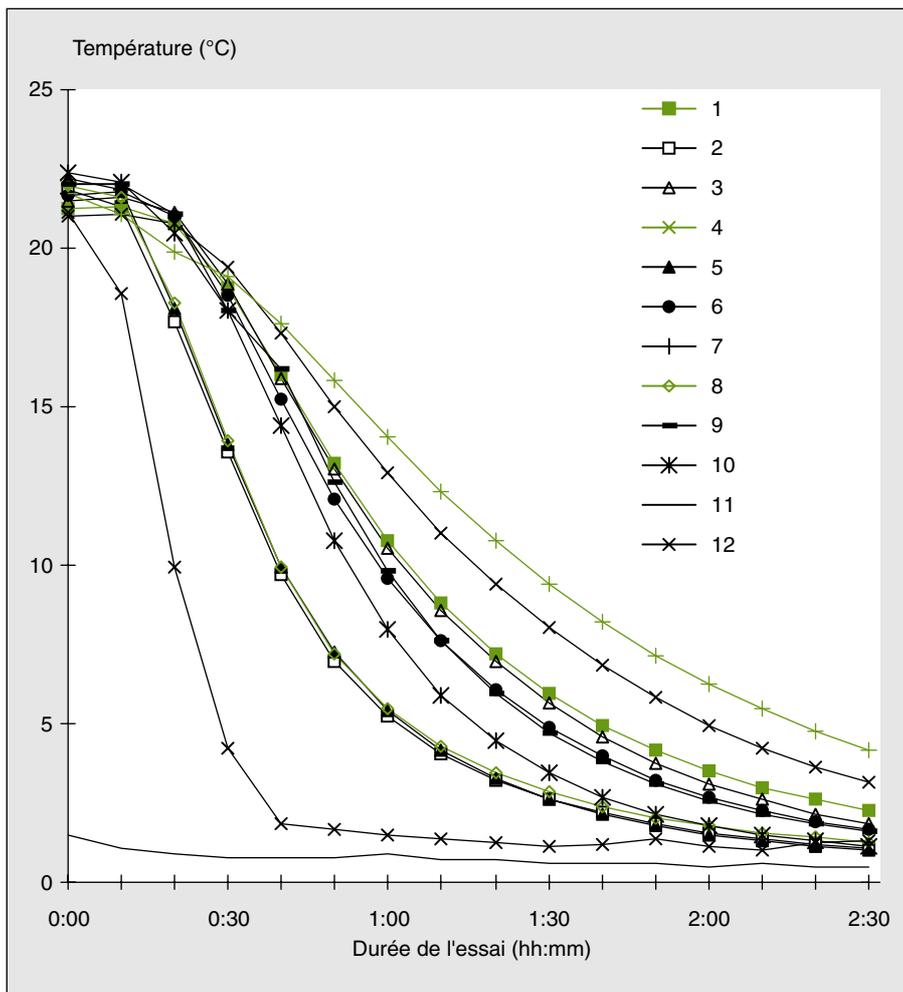
### Interaction entre les paramètres

Un effet interactif apparaît entre la pression statique et la densité d'emballage sur le débit d'air ( $F_{4, 34}$ ,  $P = 0,0292$ ). Cet effet interactif entre la pression et la densité d'emballage alors que la densité d'emballage seule n'a pas d'effet pourrait être explicable par le fait qu'à faible pression, la densité d'emballage n'a pas d'effet alors qu'elle en aurait une à plus haute pression. Des essais à plus haute pression ou à plus faible densité d'emballage seraient nécessaires pour démontrer ce point. Toutefois, peu d'intérêt pratique existe pour ce genre d'essais car une diminution importante de la densité d'emballage augmenterait drastiquement le volume des entrepôts. Seul le développement d'un système de refroidissement en continu justifierait de tels essais.

### Refroidissement du produit

Étant donné que la densité d'emballage et le type de contenant n'ont pas eu d'effet significatif sur le débit d'air passant à travers la masse de produit, seuls les effets de la pression et de la position des points de lecture ont été évalués. Les résultats du refroidissement de poireaux à l'air forcé prennent généralement la même allure bien que la vitesse de refroidissement puisse varier d'un point à l'autre à l'intérieur d'une même boîte-palette (figure 4).

Les  $T_{1/2}$  obtenus ne sont pas reliés à la position des points de lecture à l'intérieur des boîtes-palettes ( $F_{9, 38}$ ,  $P = 0,1510$ ). En revanche, le  $T_{1/2}$  a diminué de façon significative avec l'augmentation de la pression statique ( $F_{9, 38}$ ,  $P = 0,0023$ ). Ainsi, le  $T_{1/2}$  de 45,0 minutes obtenu en utilisant une pression statique de



**Figure 4.** Température (°C) dans les poireaux emballés en boîtes-palettes (nos 1 à 10, figure 2) et température de l'air après (n° 11) et avant (n° 12) la masse de produit en fonction du temps (hh:mm) au cours d'un refroidissement à l'air forcé en utilisant une pression statique de 25,4 mm d'eau.

**Figure 4.** Temperature (°C) of leeks packed in bins (# 1 to 10, figure 2) and temperature of the air after (# 11) and before (# 12) the mass of produce as a function of time (hh:mm) during forced-air cooling process using a 25,4 mm-of-water static pressure.

12,7 mm d'eau a diminué à 31,6 minutes lorsqu'une pression de 25,4 mm d'eau a été utilisée.

De plus, de meilleures valeurs de U ont été obtenues en utilisant des pressions plus élevées ( $F_{1,2}$ ,  $P = 0,0068$ ). En effet, les valeurs de U étaient de 19,2 et 9,6 minutes pour des pressions statiques de 12,7 et 25,4 mm respectivement. Ces  $T_{1/2}$  représentent des temps de refroidissement ( $T_{7/8}$ ) [25] du poireau de  $95 \pm 29$  minutes comparé à  $135 \pm 58$  minutes pour des pressions statiques de 25,4 et 12,7 mm d'eau respectivement, soit une augmentation de plus de 56 % du temps d'opération des systèmes de réfrigération.

Les résultats des essais de refroidissement à l'air forcé ont été comparés à ceux d'essais de refroidissement en chambre

réfrigérée commerciale, à l'eau et sous vide présentés dans la littérature [12]. Les résultats des essais de refroidissement utilisant les différents types de refroidisseurs sont représentés au *tableau 1*. Les  $T_{1/2}$  moyens et U sont utilisés pour comparer les performances des systèmes. Cette comparaison démontre l'avantage certain en termes de durée de traitement du refroidissement à l'eau et sous vide avec des  $T_{7/8}$  de 32 et 25 minutes respectivement, comparé à 95 minutes pour les traitements à l'air forcé en utilisant une pression de 25,4 mm d'eau et à 40 heures pour le refroidissement en chambre commerciale. Toutefois, l'installation d'un système de sous vide est coûteuse [8] et l'utilisation du refroidissement à l'eau n'est pas recommandée pour des produits devant être entreposés pour de lon-

gues périodes en raison des risques élevés de contamination croisée.

### Conception d'un système

La conception d'un système de refroidissement du poireau devient relativement facile en utilisant les résultats des présents essais. D'après l'équation de la *figure 3*, un producteur désireux de refroidir quatre palettes de poireaux à la fois, soit environ 1 000 kg de produit, pourrait utiliser un ventilateur d'une capacité de  $2\,915 \text{ L d'air} \cdot \text{s}^{-1}$  sous une pression statique de 25 mm d'eau. Sous ces conditions, le temps requis pour retirer les 7/8 de la chaleur contenue dans la masse de poireaux serait de 95 minutes (*tableau 1*). Comme la chaleur sort du produit beaucoup plus rapidement au début du refroidissement qu'à la fin, il est généralement recommandé [25] d'utiliser un système de refroidissement capable de retirer la moitié de la chaleur sensible du produit dans un temps de demi-refroidissement, soit environ 30 minutes. Dans cet exemple, la capacité du système de réfrigération sera donc égale à la masse de produit (1 000 kg de poireaux) multipliée par sa capacité thermique ( $4,2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$ ) multipliée par 0,5 fois l'écart total de température (récolte à  $20^\circ\text{C}$  et entreposage à  $0^\circ\text{C}$ ) divisés par le temps (30 minutes), soit 23,3 kW.

## Conclusion

Cette étude démontre que l'air forcé peut être utilisé et produire de très bons résultats pour le refroidissement du poireau. La perte de pression statique à travers la masse de poireaux doit être suffisamment élevée pour obtenir une uniformité de refroidissement acceptable. Une pression statique minimale de 25 mm d'eau devrait être utilisée pour faire circuler l'air à travers une boîte-palette de poireaux. Une seule rangée de palettes de chaque côté d'un tunnel de refroidissement devrait être utilisée. Finalement, les types de contenants (caisses en bois et caisses en plastique) et la densité d'emballage n'ont pas modifié significativement le passage de l'air à travers la masse de poireaux. Ainsi, il n'est pas avantageux de réduire la densité d'emballage et donc il faut utiliser des palettes pleines.

Même si les résultats sur le refroidissement du poireau à l'eau ou sous vide présentés dans la littérature montrent un avantage de rapidité sur le refroidisse-

ment à l'air forcé, cette dernière méthode présente des avantages sérieux. L'installation d'un système de sous vide est très coûteuse [9] et l'utilisation du refroidissement à l'eau n'est pas recommandée pour des produits devant être entreposés pour de longues périodes en raison des risques élevés de contamination croisée. La conception d'un système de refroidissement à l'air forcé est aussi plus simple et plus versatile que les systèmes sous vide ou à l'eau froide. ■

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Les Cultures de Chez Nous Inc., Sainte Brigitte des Saults (Québec) Canada, pour avoir fourni le matériel végétal, ainsi que Dr Marie-Thérèse Charles pour son aide dans l'analyse des résultats.

## Références

1. Hruschka HW. *Storage and shelf life of packaged leeks*. Market Resources Report. 1084. Washington (DC) : U.S. Department of Agriculture, 1978 ; 19 p.
2. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). Methods of precooling fruits, vegetables, and cut flowers. In : *Refrigeration, ASHRAE Handbook* (SI Edition). Atlanta (Géorgie) : ASHRAE, Inc., 1998 ; 10 p.
3. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). Vegetables. In : *Refrigeration, ASHRAE Handbook*. Atlanta (Géorgie) : ASHRAE, Inc., 1998 : 23.1-23.14.
4. Handenburg RB, Watada AE, Wang CY. *The commercial storage of fruits, vegetables, and florist and nursery stocks*. Agriculture handbook 1986, No. 66 (revised). Washington (DC) : U.S. Department of Agriculture, 1986 ; 136 p.
5. Goffing G, Herregods M. Storage of leeks under controlled atmospheres. *Acta Horti* 1989 ; 258 : 481-4.
6. Oregon State University (OSU). *Leek, Commercial vegetable production Guides*. Home Page. North Willamette Research and Extension Services, Oregon State University. <http://oregonstate.edu/Dept/NWREC/leek.html>
7. Gariépy Y, Raghavan GSV, Okasse R, Phan CT, Thériault R. Long-term storage of cabbage, celery, and leeks under controlled atmosphere. *Acta Horti* 1984 ; 157 : 193-201.
8. Vigneault C, Gariépy Y, Roussel D, Goyette B, Brodeur C. Effet du délai avant le prérefroidissement sur la qualité et la vie utile du brocoli. *Agricultures* 2001 ; 10 : 121-4.
9. Kader AA, ed. *Postharvest technology of horticultural crops*. Publication No 3311. Davis (Californie) : University of California, 1992 ; 296 p.
10. Boyette MD, Estes EA. *Crushed and Liquid Ice Cooling*. Postharvest Technology Series AG-414-5. Greensboro (Caroline du Nord) : North Carolina Cooperative Extension Service, North Carolina State University, 1992 ; 8 p.
11. André P, Blanc R, Buret M, et al. Essai de conservation d'épinard, de haricot vert, de persil et de poireau au moyen de la prérefrigération par le vide, associée à des atmosphères modifiées et au froid. *Rev Hort* 1980 ; 207 : 37-42.
12. Vigneault C, Gariépy Y, Goyette B, Roussel D, DeEll J. *Développement d'un système de prérefroidissement du poireau. Rapport final présenté aux Cultures de Chez Nous Inc. Centre de Recherche et de Développement en Horticulture*. St-Jean-sur-Richelieu (Canada) : Agriculture et Agro-Alimentaire Canada, 1997 ; 31 p.
13. Vigneault C, Goyette B, Raghavan GSV. Continuous flow liquid-ice system tested on broccoli. *Can Agric Eng* 1995 ; 37 : 225-30.
14. Goyette B, Vigneault C, Panneton B, Raghavan GSV. Method to evaluate the average temperature at the surface of horticultural crop. *Can Agric Eng* 1996 ; 38 : 291-5.
15. Hass E, Felsenstein G, Shitzer A, Manor G. Factors affecting resistance to air flow through packed fresh fruit. *ASHRAE Trans* 1976 ; 82 : 548-54.
16. Vigneault C, Goyette B. Design of plastic container openings to optimize forced-air precooling of fruits and vegetables. *Applied Engineering in Agriculture* 2002 ; 18 : 73-6.
17. Chau KV, Gaffney JJ, Baird CD, Church GA. Resistance to air flow of oranges in bulk and in cartons. *Trans ASAE* 1985 ; 28 : 2083-8.
18. Vigneault C, Markarian NR, da Silva A, Goyette B. Pressure drop during forced-air circulation of various horticultural produce. *Trans ASAE* 2004 ; 47 : 807-14.
19. da Silva A, Goyette B, Vigneault C. *La circulation à l'air forcé à travers une masse de fruits ou légumes frais. Rapport final présenté à Provigo Distribution Inc. Centre de Recherche et de Développement en Horticulture*. St-Jean-sur-Richelieu (Canada) : Agriculture et Agro-Alimentaire Canada, 1996 ; 25 p.
20. Fraser HW. *Forced-air rapid cooling of fresh Ontario fruits and vegetables*. AGDEX 202-736. Toronto (Ontario) : Ministry of Agriculture and Food, 1991 ; 4 p.
21. Ryall AL, Pentzer WT. *Handling, transportation, and storage of fruits and vegetables. Volume 2 : Fruits and Tree Nuts*. Westport (Connecticut) : The AVI Publishing Company, Inc., 1974 ; 545 p.
22. Émond JP, Mercier F, Sadfa SO, Bourré M, Gakwaya A. Study of parameters affecting cooling rate and temperature distribution in forced-air precooling of strawberry. *Trans ASAE* 1996 ; 39 : 2185-91.
23. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). Measurement and instruments. In : *Fundamentals, ASHRAE Handbook (SI Edition)*. Atlanta (Géorgie) : ASHRAE Inc., 2001 ; 34 p.
24. Vigneault C, Émond JP. *Reusable container for the preservation of fresh fruits and vegetables. Patent Number : 5,727,711*. Washington (DC) : United States Patent Application Office, 1997 ; 60 p.
25. Cortez LAB, de Castro LR, Vigneault C. Resfriamento rápido a ar : Métodos da câmara frigorífica e do ar forçado. In : Cortez LAB, Honório SL, Moretti CL, eds. *Resfriamento de frutas e hortaliças*. Brasília (DF, Brésil) : Embrapa Informaçã Tecnológica, 2002 : 231-72.