

Largeur des ouvertures au fond de contenants de plastique utilisés pour la manutention de produits horticoles frais

C. Vigneault et B. Goyette

Centre de Recherche et de Développement en Horticulture, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 430 Boul. Gouin, Saint-Jean-sur-Richelieu, QC, Canada J3B 3E6. Numéro de contribution: 335/2002.02.01R.

Vigneault, C. et Goyette, B. 2002. **Largeur des ouvertures au fond de contenants de plastique utilisés pour la manutention de produits horticoles frais.** Canadian Biosystems Engineering/Le génie des biosystèmes au Canada **44**:3.7-3.10. Un programme de recherche a été entrepris en collaboration avec l'industrie pour développer un contenant de plastique réutilisable offrant la possibilité d'une meilleure conservation de la qualité lors de la manutention de produits horticoles. L'objectif particulier de cette phase était de déterminer la forme et la surface relative des ouvertures situées au fond d'un contenant de plastique afin d'uniformiser le débit d'eau s'écoulant à travers toute la surface du contenant. Les résultats démontrent que pour des ouvertures de largeur variant entre 3,2 et 17,7 mm, la forme de l'ouverture submergée a un effet important sur la formation d'un vortex lors de l'écoulement de l'eau et que la présence d'un vortex diminue à près de 50% l'écoulement de l'eau à travers cette ouverture. La largeur de l'ouverture et la hauteur d'eau déterminent la formation d'un vortex au-dessus d'une ouverture submergée. En utilisant des ouvertures de 3,2 mm, il est possible de calculer quel pourcentage de la surface du fond d'un contenant doit être occupé par des ouvertures afin d'uniformiser l'écoulement de l'eau sur toute sa surface. **Mots clés:** vortex, ouverture, prérefroidissement, manutention.

A research program has been initiated in collaboration with the industry to develop a reusable plastic container that offers the best possibility of conservation of quality during handling of horticultural products. The particular objective of this phase was to determine the shape and the percentage of openings located at the bottom of a plastic container needed to generate a uniform flow of water running through the container. The results show that for openings of width varying from 3,2 to 17,7 mm, the shape of a submerged opening has a marked effect on the formation of a vortex due to the water flow, and the presence of a vortex decreases the flow of water through this opening by 50%. The width of the opening and the height of water determine the formation of a vortex above a submerged opening. By using openings of 3,2 mm, it is possible to calculate the percentage of the surface at the bottom of the containers that has having to be covered by openings to make the water flow uniformly on its entire surface. **Keywords:** vortices, openings, hydrocooling, handling.

INTRODUCTION

Le taux de refroidissement d'un produit horticole dépend principalement de l'écart de température entre le fluide caloporteur et le produit, des caractéristiques physiques du

produit, et du débit du fluide caloporteur s'écoulant autour du produit. Ainsi, en considérant une température de fluide uniforme et des caractéristiques physiques immuables, seul le débit du fluide peut influencer le taux de refroidissement des produits horticoles traités. Dans le cas d'un système de prérefroidissement à l'eau, l'importance de l'uniformité de la distribution de l'eau sur la masse de produit a déjà été clairement établie (Kader 1992). Toutefois, dans le cas de produits déjà emballés dans des boîtes, ce facteur a été très largement négligé. En effet, l'uniformité de la distribution de l'eau n'a aucunement été considérée lors de la conception des boîtes, car les aspects structuraux étaient plus importants. Il faut noter que les produits emballés en boîtes de carton sont généralement prérefroidis en vrac à l'eau avant leur emballage final. Le prérefroidissement à l'eau n'est généralement utilisé qu'avec des produits emballés en boîtes de bois et ces dernières n'offrent que peu de possibilité d'ouverture pour le passage de l'eau.

L'avènement de l'utilisation du plastique pour la fabrication d'emballage de produits horticoles offre de nouvelles possibilités en terme de conception des contenants. Ainsi, le plastique offre la possibilité de prendre en compte les aspects de conservation de la qualité des produits horticoles sans restrictions liées aux aspects structuraux des contenants. En considérant des contenants de produits horticoles empilés en colonnes, la forme, le nombre et la distribution des ouvertures situées dans le fond d'un contenant peuvent être étudiés pour permettre d'obtenir une distribution uniforme de l'eau pour les contenants sous-jacents.

L'objectif général du travail était de développer, en collaboration avec l'industrie, un contenant de plastique réutilisable qui offre la meilleure possibilité de conservation de la qualité lors de la manutention de produits horticoles (Vigneault et Émond 1998). Cette recherche a été divisée en plusieurs phases indépendantes. L'objectif particulier de la phase qui est rapportée ici, était de déterminer la forme des ouvertures situées au fond d'un contenant de plastique produisant un débit uniforme d'eau correspondant au débit maximal recommandé dans un système de prérefroidissement

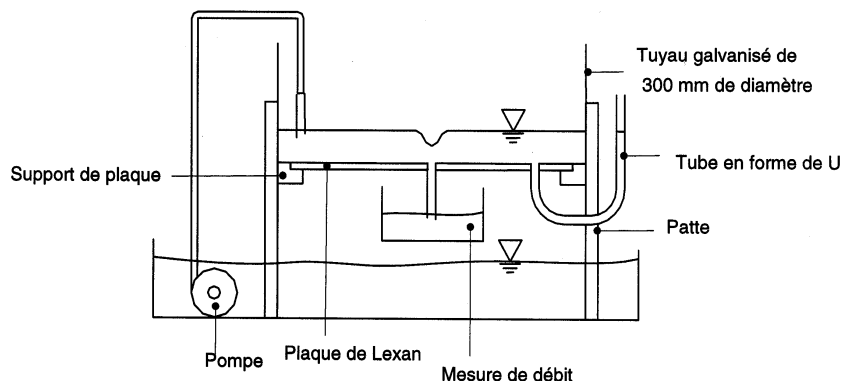


Fig. 1. Montage utilisé pour mesurer les débits d'eau à travers des ouvertures de différentes formes en utilisant différentes hauteurs d'eau.

(Kader 1992). L'hypothèse de départ étant qu'il existe une relation mesurable entre le débit d'eau passant par une ouverture, la hauteur de la colonne d'eau au-dessus de cette ouverture et la géométrie de l'ouverture.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Tous les tests ont été effectués à l'aide d'un montage expérimental construit à cette fin. Le montage est composé d'une plaque de Lexan, d'un support de plaque, d'une pompe et d'un réservoir d'eau.

Des ouvertures de 161 mm² de surface ont été perforées sur une plaque de Lexan (polymère thermoplastique carbonaté) de 254 mm de diamètre par 3,2 mm d'épaisseur. Les longueurs des ouvertures ont été ajustées pour obtenir la surface désirée tout en ayant des largeurs de 1,6, 3,2, 6,4, 9,6 et 12,7 mm. Des ouvertures de 3,2 mm de large ont été perforées dans une deuxième plaque identique à la première. Les longueurs de ces ouvertures étaient de 3,2, 6,4, 12,7 et 25,4 mm. Toutes les ouvertures ont ainsi une forme de rectangle aux bouts arrondis. Le rayon de courbure de la partie arrondie de l'ouverture est égale à la demi-largeur de chaque ouverture. Cette forme a été déterminée en fonction de la facilité de fabrication de moules commerciaux servant à la fabrication éventuelle de contenants. La distance entre chaque ouverture est telle qu'il était possible de mesurer le débit d'eau s'écoulant par une seule ouverture à la fois. Une ouverture supplémentaire a été perforée dans chacune des plaques pour recevoir un tube disposé en forme de U qui a été utilisé pour mesurer la hauteur de la colonne d'eau submergeant la plaque lors des essais.

Le montage a été fabriqué à l'aide d'un tuyau galvanisé de 300 mm de diamètre par 230 mm de long (Fig. 1) dans lequel se trouve un support de plaque de 25,4 mm d'épaisseur et de diamètre interne de 235 mm muni d'un chanfrein servant à maintenir en place la plaque de Lexan. L'étanchéité du montage est garantie à l'aide de graisse pour éviter les erreurs de mesure des débits d'eau lors des essais. Le montage a été surélevé au-dessus d'un réservoir à l'aide de trois pattes pour permettre la prise de mesure du débit d'eau s'écoulant par une des ouvertures. Le réservoir servait à recueillir l'eau s'écoulant par les ouvertures pendant toute la durée des essais.

Une grille métallique a été utilisée afin d'empêcher la formation d'un vortex. La grille circulaire de 50 mm de

diamètre est constituée d'un grillage de fils d'acier galvanisé de 0,5 mm de diamètre entrecroisé à angle droit à une distance de 2,8 mm et couvrant ainsi 3,5% de sa surface. La bordure de la grille a été pliée à 90° pour la maintenir à 5 mm au-dessus de la plaque de Lexan.

Lors des essais, l'eau du réservoir a été acheminée au-dessus de la plaque contenant les ouvertures à l'aide d'une pompe munie d'une tuyauterie et d'une valve ajustable manuellement. Cette dernière permettait d'ajuster le débit de la pompe pour maintenir le niveau d'eau au-dessus de la plaque aux cinq hauteurs désirées, soit 5, 10, 20, 30 et 40 mm. La hauteur maximale de 40 mm a été choisie en considérant qu'un contenant utilisé pour la manutention des produits horticoles devrait

être muni d'ouvertures latérales situées à une distance maximale de 40 mm du fond du contenant pour permettre une distribution uniforme de l'air lors d'un refroidissement à l'air forcé (Vigneault et Émond 1998). Pour chaque hauteur d'eau donnée, une mesure de débit d'eau a été réalisée pour chacune des ouvertures tout en maintenant une hauteur uniforme. La quantité d'eau passant par chaque ouverture a été ainsi recueillie et mesurée à l'aide d'une balance digitale de précision de ± 5 g.

Chaque série de mesures a été reprise trois fois en réajustant à chaque fois la hauteur de la colonne d'eau; le débit d'eau moyen (mL/s) a été calculé à partir de ces résultats. L'ordre dans lequel les mesures ont été prises a été choisi de façon aléatoire. La présence d'un vortex était prise en note lorsqu'une dépression à la surface de l'eau était facilement observable.

Surface d'ouverture fixe

La première plaque contenant des ouvertures de même surface a permis de déterminer l'effet de la forme des ouvertures et la hauteur d'eau au-dessus de l'ouverture sur le débit d'eau et la formation d'un vortex. Les débits d'eau de chaque fente ont été mesurés pendant une durée de 30 secondes. Tous les essais ont été réalisés sans l'utilisation de la grille, puis avec la grille.

Largeur d'ouverture fixe

La deuxième plaque contenant des ouvertures de largeur fixe, mais de longueur variable a été utilisée pour étudier la relation entre la hauteur d'eau, la longueur des fentes et le débit d'eau. Cette largeur de 3,2 mm a été choisie à partir des résultats obtenus avec la première plaque. Les débits d'eau de chaque fente ont été mesurés pendant 60 secondes. Tous les essais ont été réalisés sans l'usage de la grille.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Surface d'ouverture fixe

Les moyennes des trois débits d'eau (mL/s) mesurés pour chacun des essais en fonction des cinq différentes hauteurs (mm) pour les cinq largeurs d'ouverture avec et sans l'utilisation de la grille, sont présentées au Tableau 1. Dans ce tableau, les données entre parenthèses indiquent des écoulements d'eau générant la formation d'un vortex à chaque réplicat. L'écart type moyen sur les mesures répétées de mêmes débits est de $\pm 1,2\%$. Toutefois, l'écart type moyen sur les mesures répétées

Tableau 1. Résultats des essais de mesures de débit d'eau (mL/s) en fonction de la hauteur d'eau et de la largeur d'ouverture de 161 mm² de surface.

	Largeur (mm)	Débit (mL/s) en fonction de la hauteur d'eau (mm)				
		5	10	20	30	40
Sans grille	2,6	47,6	76,0	98,6	117,1	141,9
	3,2	36,2	65,3	87,5	106,4	122,3
	6,4	(23,4)*	(30,5)	(41,5)	(51,6)	(60,1)
	9,6	(17,7)	(23,5)	68,5	82,7	96,2
	12,7	(15,1)	(26,5)	74,4	91,3	103,5
Avec grille	2,6	53,8	71,0	97,6	119,7	133,8
	3,2	48,1	65,7	88,8	105,5	121,9
	6,4	43,2	58,6	75,0	92,7	103,7
	9,6	41,1	56,0	73,4	85,5	96,5
	12,7	45,9	58,7	73,7	89,4	98,5

* Les données entre parenthèses indiquent des écoulements d'eau générant la formation d'un vortex à chaque répliat.

présentant un vortex est environ deux fois plus élevé que celui sans vortex; soit 1,73% et 0,88% respectivement.

Les ouvertures inférieures ou égales à 3,2 mm de largeur n'ont jamais présenté de vortex. Dans aucun cas, l'utilisation de la grille n'a diminué de façon importante le débit d'eau à travers l'ouverture. Dans certains cas, des ouvertures ayant des largeurs supérieures à 3,2 mm ont présenté, de façon répétée, une augmentation considérable du débit d'eau lors de l'utilisation de la grille. Dans tous ces cas, la formation d'un vortex à la surface de l'eau au-dessus de l'ouverture avait été notée lors des essais sans grille. La présence de la grille a donc toujours éliminé la formation d'un vortex, ce qui a permis de mesurer l'effet de la présence d'un vortex. La formation d'un vortex a diminué en moyenne de 51,3% le débit d'eau à travers l'ouverture.

Une augmentation de la hauteur d'eau au-dessus de l'ouverture a aussi éliminé la formation d'un vortex pour des largeurs d'ouverture de 9,6 et 12,7 mm. Cette observation de l'apparition de vortex à des hauteurs plus faibles a d'ailleurs déjà été rapportée lors de la vidange de réservoirs par une ouverture submergée de 9,6 mm (Shapiro 1962; Trefethen et al. 1965). L'augmentation de l'épaisseur d'eau aurait pour effet de diminuer la vitesse moyenne d'approche de l'eau, augmenter le volume d'eau à mettre en mouvement pour former le vortex et créer un effet stabilisateur dans l'écoulement du liquide.

La force de Coriolis est souvent considérée comme la cause de la formation d'un vortex lors d'écoulement à travers une prise d'eau submergée dans un réservoir (Scorer 1997). Le nombre adimensionnel de Rossby, R_o (Éq. 1) a été développé pour comparer les forces en présence dans l'écoulement d'un liquide passant à travers des orifices submergés; soit la force de Coriolis et la force d'inertie du liquide (Weast et Astle 1979):

$$R_o = V\omega^{-1}L^{-1} \quad (1)$$

où:

R_o = nombre de Rossby,
 V = vitesse caractéristique du fluide (m/s),

ω = vitesse angulaire de la rotation de la terre ($0,72 \times 10^{-4}$ rad/s), et

L = grandeur caractéristique (m).

En utilisant comme limite supérieure une valeur du R_o égale à l'unité pour que la force de Coriolis ait un effet sur l'écoulement du liquide, on obtient un temps de résidence minimal de 3,8 h du liquide à l'intérieur d'un réservoir. Ce temps de résidence étant nettement supérieur au temps de résidence de l'eau dans un contenant lors de prérefroidissement de produits horticoles, soit moins d'une minute. L'effet de la force de Coriolis doit donc être négligée.

Même si la source de la formation de vortex est encore mal connue (Carriveau et Baddour 1999), un vortex diminue quand même considérablement le débit d'eau dans les canalisations dont l'entrée est submergée (Gulliver et Rindels 1987). Ce phénomène est ainsi largement étudié lors de la conception des barrages (Jain et al. 1978; Hecker 1981; Gordon 1970). Il est utilisé, soit pour évacuer les débris flottants à la surface de l'eau en les aspirant par le vortex créé par des conduits spécifiquement conçus à cette fin; soit pour éviter que les débris soient aspirés par les conduits qui apportent l'eau aux turbines des barrages hydroélectriques, pouvant y causer des dommages (Baddour 1998). Il n'existe toutefois pas d'étude sur l'effet de ces tourbillons à plus petite échelle.

Ainsi, les écoulements d'eau à travers une ouverture ayant donné lieu à la formation d'un vortex sont beaucoup plus lents et moins répétitifs. La hauteur d'eau au-dessus d'une ouverture et la forme de l'ouverture peuvent être utilisés pour contrôler la formation de vortex. Des ouvertures de 3,2 mm de large et moins permettent d'éviter la formation de vortex. Toutefois, au point de vue de la structure, il est préférable d'utiliser des ouvertures plus larges pour en diminuer le nombre total. De plus, les risques d'obstruction des ouvertures diminuent avec l'augmentation de leur largeur.

Largeur d'ouverture fixe

Les débits d'eau mesurés en fonction des cinq hauteurs d'eau pour les quatre longueurs d'ouverture de 3,2 mm de large sont présentés à la Fig. 2. Pour des hauteurs d'eau augmentant de 5 à 40 mm, les débits augmentent d'une façon régulière pour une même longueur de fente. Des tentatives de prises de mesure à des hauteurs inférieures à 5 mm ont donné des résultats non-répétitifs. Ces résultats n'ont pas été considérés dans les analyses et il est donc recommandé d'utiliser les hauteurs d'eau égales ou supérieures à 5 mm pour permettre un écoulement plus stable de l'eau à travers le plancher du contenant. La relation qui existe entre le débit d'eau (Q_o , L/s⁻¹), la longueur d'une ouverture (L_o , mm) de 3,2 mm de large et la hauteur de la colonne d'eau (H_e , mm) au-dessus de l'ouverture est présentée à l'équation empirique 2. Pour des hauteurs d'eau supérieures à 5 mm, le débit d'eau varie donc de façon pratiquement linéaire avec la longueur d'ouverture et les effets de bouts ou d'extrémités deviennent peu importants:

$$Q_o = 0,122H_e^{0,72}L_o^{1,1} \quad (R^2 = 0,9885) \quad (2)$$

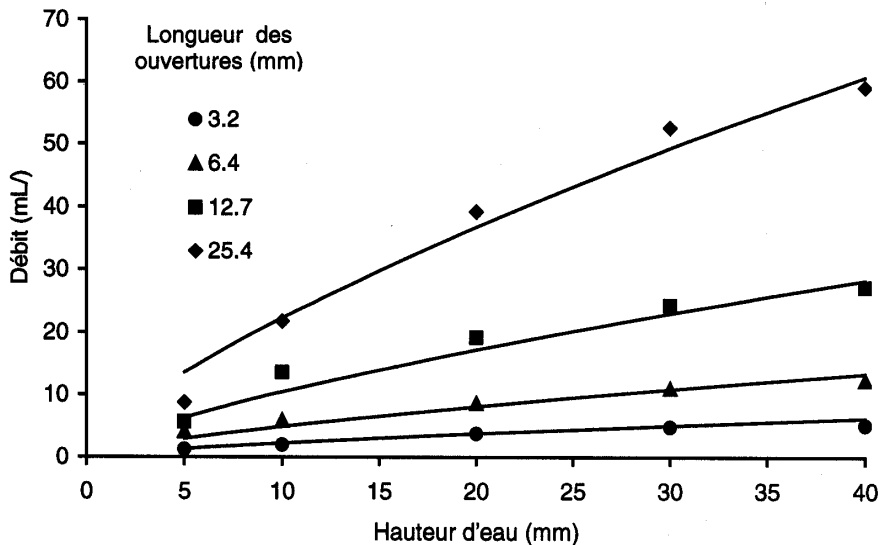


Fig. 2. Résultats des mesures de débit d'eau (mL/s) en fonction de la hauteur d'eau et de la longueur des ouvertures ayant 3,2 mm de large.

En utilisant les résultats obtenus par l'équation 2 pour des ouvertures de 3,2 mm de large, il est possible de calculer le pourcentage d'ouverture nécessaire au fond d'un contenant (P_o , %) en fonction du débit d'eau s'écoulant à travers des contenants par unité de surface (Q_u , $L \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$), de la hauteur d'eau (H_e , mm) et de la longueur moyenne des ouvertures (L_o , mm) au fond du contenant (Éq. 3).

$$P_o = 0,04372 Q_u H_e^{-0.72} L_o^{-0.1} \quad (3)$$

En pratique, les ouvertures des charnières d'un contenant de plastique pliable doivent être situées plus haut que la hauteur d'eau pouvant s'accumuler au fond du contenant pour y éviter la perte d'eau par les parois latérales du contenant. Dans ce cas, il est préférable de ne pas avoir de charnières situées très haut pour éviter un volume excessif de contenants à transporter lorsqu'ils sont vides. Les hauteurs d'eau à utiliser devraient donc se situer entre 5 et 20 mm. D'après Kader (1992), les débits d'eau à utiliser dans un système de prérefroidissement doivent être entre 600 à 1000 $L \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$. En utilisant le débit maximal recommandé et une hauteur d'eau accumulée au fond du contenant de 10 mm, on obtient des pourcentages d'ouvertures au fond des contenants de 6,6 et 5,6% pour des longueurs d'ouverture de 10 et 50 mm respectivement. Ce pourcentage ne variant que très peu en fonction de la longueur des ouvertures, soit 15% de sa valeur pour des ouvertures cinq fois plus longues, la moyenne des longueurs des ouvertures peut être utilisée pour fins de calculs dans le cas où des contenants auraient des longueurs d'ouvertures non-uniformes.

CONCLUSIONS

Les résultats de ces travaux démontrent que pour des ouvertures oblongues de largeur variant entre 3,2 et 17,7 mm, la hauteur d'eau et la forme d'ouverture submergée ont un effet important sur la formation d'un vortex lors d'écoulement d'eau. La

formation d'un vortex au-dessus d'une ouverture diminue de près de 50% l'écoulement de l'eau. La largeur de l'ouverture et la hauteur d'eau peuvent être utilisées pour contrôler la formation d'un vortex au-dessus d'une ouverture submergée. Les effets de bouts ou d'extrémité sur l'écoulement de l'eau à travers une ouverture submergée sont presque négligeables pour des ouvertures égales ou inférieures à de 3,2 mm de large. Le pourcentage de la surface du fond d'un contenant devant être couvert par des ouvertures peut être calculé en fonction de la hauteur d'eau s'accumulant au fond du contenant, de la longueur moyenne des ouvertures et du débit d'eau par unité de surface.

REFERENCES

- Baddour, R.E. 1998. Zebra mussel control with turbulent bubble screen. 12th ASCE Engineering Mechanical Conference (CD ROM). La Jolla, CA.
- Carriveau, E.C. et R.E. Baddour. 1999. Investigation of internal vortices at submerged water intakes. Proceedings of ASCE Engineering Mechanics Conference (CD Rom). John Hopkins University, Baltimore, NJ.
- Gordon, J.L. 1970. Vortices at intake structures. *Water Power* 4: 136-138.
- Gulliver J.S. et A.J. Rindels. 1987. Weak vortices at vertical intakes. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 113(9):1101-1116.
- Hecker G.E. 1981. Model-prototype comparison of free surface vortices. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE* 107(10): 1243-1259.
- Jain, A.K., K.G.R. Raju et R.J. Garde. 1978. Vortex formation at vertical pipe intakes. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE* 100(10): 1427-1445.
- Kader, A.A. (ed.) 1992. Postharvest technology of horticultural crops, 2nd edition. Publication No. 3311. Cooperative Extension Unit of California. Division of Agriculture and Natural Resources. University of California, Davis, CA.
- Scorer, R.S. 1997. *Weather and Climate*. New York, NY; John Wiley.
- Shapiro, A.H. 1962. Bath-tub vortex. *Nature* 196:1080-1081.
- Trefethen, L.M., R.W. Bilger, P.T. Fink, R.E. Luxton et R.I. Tanner. 1965. The bath-tub vortex in the southern hemisphere. *Nature* 207:1084-1085
- Vigneault, C. et J.P. Émond. 1998. Reusable container for the preservation of fresh fruits and vegetables. Numéro de brevet: 5,727,711. Washington, DC: United States Patent Application Office.
- Weast, R.C. et M.J. Astle (editors). 1979. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 59th edition. West Palm Beach, FL: Chemical Rubber Co. Inc.