HUMIDIFICATION ET REFROIDISSEMENT EVAPORATIF APPLIQUES A LA CONSERVATION DES FRUITS ET LEGUMES DANS DES VITRINES REFRIGEREES OUVERTES

E. Powaga*[1], F. Cauneau[1], P.H. Biwole[2], M. Ibrahim[3] et F. Richard[4]

[1]Laboratoire PERSEE, MINES ParisTech, 06904 Sophia Antipolis, France ; [2]Institut Pascal, Université Clermont Auvergne, 63178 Aubière, France ; [3] Polytech'Lab, Université Côte d'Azur, 06903 Sophia Antipolis, France ; [4]Groupe ARFITEC, 114 chemin de Saint-Marc,06130 Grasse, France
*Courriel de l'orateur : emilie.powaga@mines-paristech.fr

TITLE

Humidification and evaporative cooling applied to the preservation of fruit and vegetables in open refrigerated display cabinets

RESUME

Environ 45% de la production mondiale de fruits et légumes (FL) sont annuellement perdues malgré les efforts réalisés pour recourir à la chaine du froid dans la logistique post-récolte. En plus de n'être pas particulièrement adaptées aux FL, les techniques classiques de froid industriel sont énergivores et source d'émission de GES. Du fait des progrès décisifs qu'ils ont permis d'accomplir dans le domaine de la conservation des FL, les dispositifs basés sur la brumisation sont prometteurs. Cette étude illustre les potentialités de l'injection d'un aérosol d'eau dans une enceinte réfrigérée en termes de rafraichissement et d'humidification de l'ambiance et en termes de diminution de perte de masse des FL entreposés.

ABSTRACT

Approximately 45% of the world's fruit and vegetable (F&V) production is still lost annually despite efforts to use the cold chain in all post-harvest logistics. In addition, conventional industrial refrigeration techniques are energy-intensive and a source of greenhouse gas emissions. Because of the decisive progress they have made in the field of F&V conservation, misting-based systems are promising. This study illustrates the potential of injecting a water aerosol into an open vertical refrigerated display case in terms of cooling and humidifying the atmosphere and in terms of preserving the stored F&V.

MOTS-CLES: aérosol d'eau, refroidissement évaporatif, conservation des produits frais / **KEYWORDS:** water aerosol, mist evaporative cooling, preservation of fresh products

1. INTRODUCTION

En France, les pertes et gaspillages alimentaires représentent encore 10 millions de tonnes de produits par an (MTE, 2021). La réfrigération permet de réduire la perte des denrées périssables. Cependant, les techniques classiques de froid industriel ne sont pas particulièrement adaptées à la conservation des fruits et légumes, dont le métabolisme actif est sensible à l'humidité et à la vitesse de circulation de l'air. Définir des conditions de réfrigération appropriées pour un produit hautement périssable est un problème non trivial. De nombreuses contraintes, parfois opposées, doivent être traitées simultanément afin de maximiser la commercialisation du produit tout en maintenant des conditions climatiques adéquates à faible coût. Les dispositifs basés sur l'évaporation d'un brouillard d'eau extrêmement fin (nébulisation - diamètre moyen des gouttes 2,5 µm) se placent parmi les procédés de rafraîchissement et de conservation des produits frais les plus prometteurs car ils permettent de limiter la perte d'eau sans mouiller tout en accélérant leur refroidissement. La figure 1 illustre l'effet de la nébulisation sur la diminution de la perte de masse des laitues au cours du temps en comparaison à une réfrigération classique ou à un environnement ambiant.

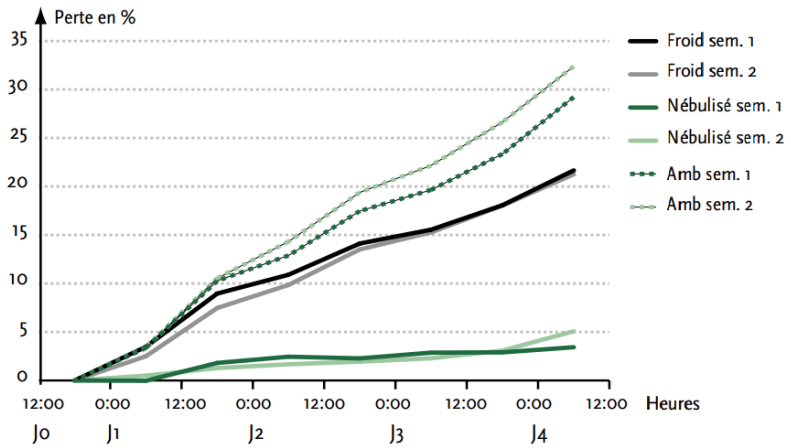

Figure 1: Pertes de masse des laitues selon l'environnement dans lequel elles sont placées (CTIFL, 2007)

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2022-27901 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

Dans les conditions ambiante ou réfrigérée, une laitue peut perdre plus de 8 à 13% de sa masse initiale en une journée. Cette perte d'eau excède déjà la perte d'eau limite, qui est évaluée entre 4 à 6% de la masse initiale (Letang, 1997) et qui se caractérise par une altération irréversible des qualités organoleptiques du produit vivant. Lorsque les laitues sont soumises à une humidification adaptée via un dispositif de nébulisation, elles préservent leur teneur en eau jusqu'à 3,5 jours d'exposition.
Le but de la présente étude expérimentale est d'évaluer l'impact de l'évaporation des gouttelettes d'eau dans une enceinte réfrigérée ouverte. Il s'agit d'évaluer d'une part le potentiel de rafraichissement et d'humidification de l'ambiance et d'autre part d'évaluer la diminution de perte de masse des FL entreposés. Ces travaux expérimentaux sont extraits d'une étude doctorale visant à améliorer la compréhension des processus en jeu lors d'un mélange d'un aérosol d'eau dans un flux d'air. Ce travail est novateur car, à ce jour, peu d'études sur l'utilisation d'aérosols d'eau dans les équipements frigorifiques ont été rapportées (Allais et Alvarez, 2001 ; Brown et al., 2004 ; Moureh et al. 2009) et aucune d'elles n'évalue la répartition spatiale du brouillard dans l'enceinte en présence de produits vivants.

2. BANC D'ESSAI ET METROLOGIE

Le banc expérimental est constitué d'une vitrine réfrigérée verticale ouverte de la marque EPTA. Le confinement de l'ambiance réfrigérée est réalisé par un rideau d'air froid, soufflé par une bouche de soufflage en partie haute du meuble à une vitesse mesurée à 1,1 m.s^{-1}. Cet air est repris par une bouche d'aspiration en partie basse de la vitrine et circule ensuite dans la veine d'air du meuble où un évaporateur frigorifique à ailette alimenté par un groupe froid externe le refroidi à une température de consigne. Cette vitrine dispose de 5 étagères, numérotée de haut (étagère 1) en bas (étagère 5) pour un volume de chargement évalué à 0,8 m^3, et d'un tube de diffusion de brouillard, situé en partie haute, alimenté par un nébuliseur de la marque ARECO, modèle *ODV7*. La vitrine est placée dans une chambre climatique afin de pouvoir contrôler les conditions ambiantes en température et d'humidité relative (T/HR), à l'aide de plusieurs sondes T/HR du fabricant E+E Electronique, modèle *EE33-M*. Les conditions ambiantes imposées dans la chambre climatique correspondent à la classe d'ambiance C0 définies dans la norme ISO 23953 (20°C et 50% HR) et sont destinées à être les plus représentatives d'un magasin. La vitrine a été instrumentée à l'aide de sondes de T/HR de la marque Sensirion, modèle *SHT85*, positionnées notamment au niveau des étagères 1, 3 et 5 (voir Figure 2). Le débit massique de l'eau nébulisée dans l'enceinte durant les essais avec nébulisation a été évalué à 1,8.10^{-4} kg.s^{-1}.

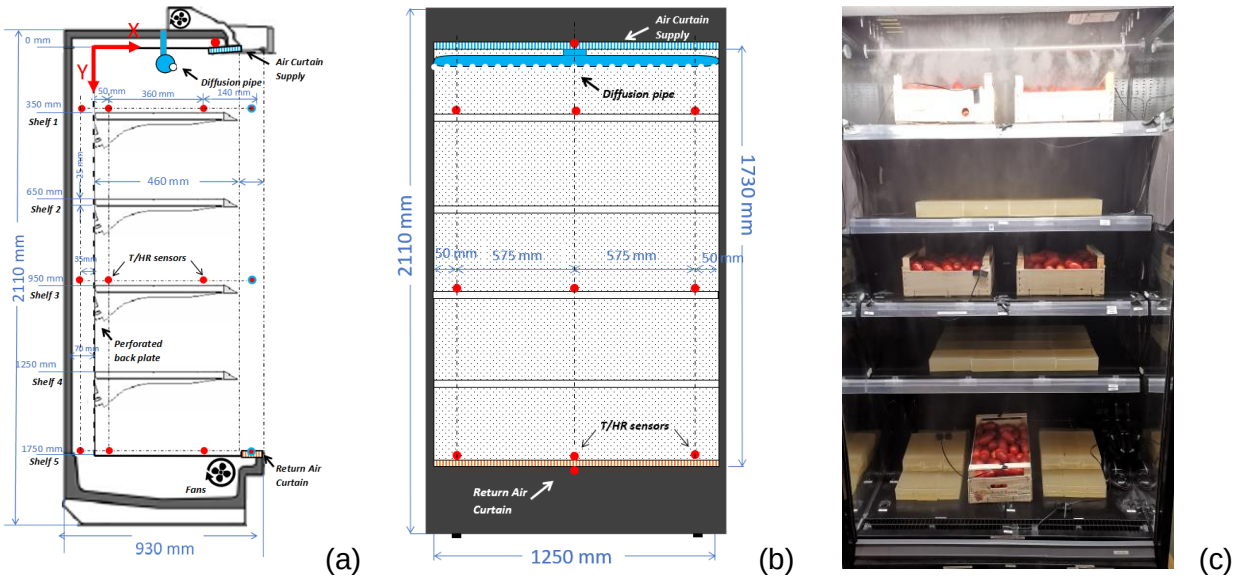

Figure 2 : Vue du dispositif de mesure de la température et de l'humidité dans la vitrine verticale ouverte : (a) vue latérale, (b) vue frontale sans produits et (c) visuel avec produits

Des essais ont été réalisés sans nébulisation et avec nébulisation selon différentes conditions de réfrigération (non réfrigérée, température de consigne 2°C, température de consigne 12°C) et sous différentes conditions de chargement (vitrine vide, avec des tomates). Une fois les conditions thermo-aérauliques de la chambre climatique stabilisées et en l'absence de produits, chaque essai a duré 3 heures. En présence de produits, la vitrine a été chargée de 5 cagettes de tomates d'un même lot, fraichement cueillis, disposées respectivement sur les étagères 1, 3 et 5. Le chargement de la vitrine a été complétée par 50kg de tests-packages (norme ISO 23953) pour occuper environ 50 % du volume total de stockage. Pour chaque étagère qui disposait de produits frais, six tomates ont été sélectionnées et pesées en début d'essai (t0), puis redéposées dans la vitrine au même emplacement. Cette opération a été répétée à t0+3h et à t0+18h afin d'avoir un suivi sur la perte de masse des produits. Les essais avec produits ont duré 18 heures.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le figure 3 présente la moyenne spatiale par étagère instrumentée (étagères 1, 3 et 5) des mesures de température (en noir) et HR (en bleu) relevées au cours du temps pour les différents essais. Le tableau 1 regroupe les moyennes asymptotiques de T/HR mesurés à l'intérieur de la vitrine et leur équivalent en fraction massique d'eau contenue dans l'air, ainsi que le poids moyen d'un produit à t0, t0+3h et t0+18h, pour les différentes configurations testées.

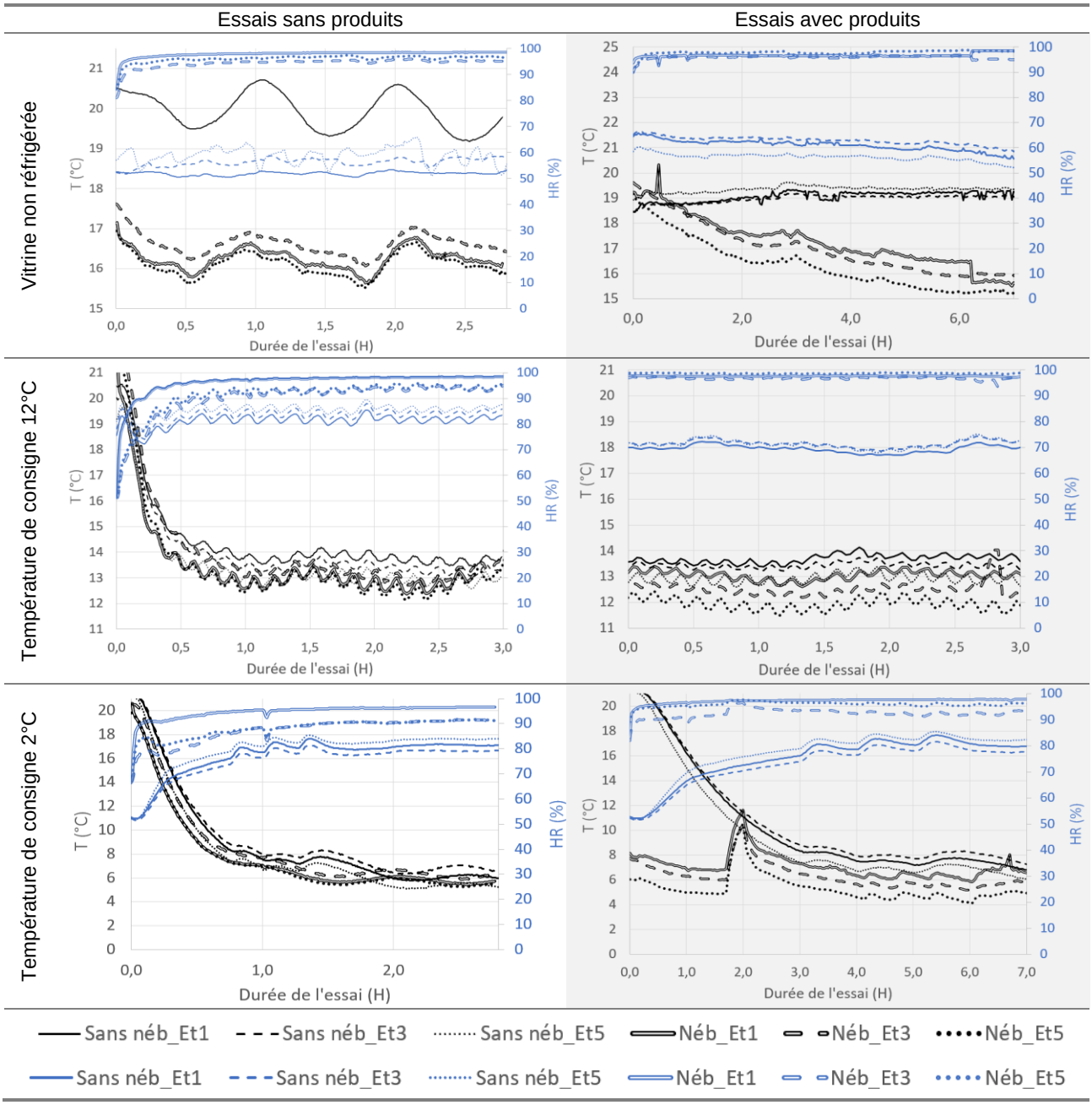

Figure 3 : Moyenne spatiale par étagères des T/HR mesurés à l'intérieur de la vitrine en fonction du temps pour différentes configurations

Les résultats montrent que l'injection d'eau nébulisée permet de diminuer les températures de l'air à l'intérieur de la vitrine jusqu'à 4°C, y compris en présence de réfrigération. Le dépôt et l'évaporation de gouttelettes à la surface des produits entraîne une diminution de la température à leur surface de 1,8 à 3,5°C. Ces effets sont d'autant plus importants lorsque les conditions aérauliques sont propices à l'évaporation des gouttelettes d'eau, c'est-à-dire lorsque l'air peut contenir de la vapeur d'eau (température de consigne de la vitrine ≥12°C). La non-uniformité de la diminution de température entre les étagères reflète de l'hétérogénéité de la distribution spatiale du dépôt de gouttelettes dans la vitrine, qui est plus concentrée en partie hausse qu'en partie basse. Lorsque la température de consigne est réglée à 2°C, l'excès d'eau est inévitable surtout proche de la source de diffusion de l'aérosol et proche des zones froides autour de l'évaporateur engendrant un risque de condensation sur les produits, un fonctionnement plus fréquent du dégivrage et une prise en glace de

l'évaporateur. L'injection d'un aérosol d'eau dans la vitrine permet de maintenir une fraction massique d'eau contenue dans l'air entre 5,4 et 11,3 g_{eau}/kg_{air} quelles que soient les conditions de réfrigération et de remplissage de la vitrine. Ces conditions permettent de limiter la perte de poids par évaporation des tomates. A *contrario*, la fraction massique d'eau contenue dans l'air d'une vitrine non nébulisée varie entre 4,8 et 8,0 g_{eau}/kg_{air} en fonction des conditions de réfrigération et de chargement de la vitrine. La perte de masse par évaporation de la tomate atteint jusqu'à 1% au terme des 18h d'exposition en fonction des conditions de réfrigération.

Tableau 1 : Moyenne asymptotiques des T/HR mesurés à l'intérieur de la vitrine et poids moyen d'un produit à t0, t0+3h et t0+18h en fonction des différentes configurations testées

Configuration de la vitrine testée			T/HR asymptotiques moyennées						Masse moyenne (kg)				
			T (°C)		HR (%)		Y(g_{eau}/kg_{air})		t0	t0+3h		t0+18h	
Non réfrigérée	Vide	Non nébulisée	20,3		52,2		7,8						
		Nébulisée	**16,3**	**-4,0**	**96,9**	**+44,7**	**11,3**	**+3,5**					
	Chargée	Non nébulisée	19,2		57,2		8,0		95,5	95,4	-0,1%	94,9	-0,6%
		Nébulisée	**15,7**	**-3,5**	**97,4**	**+40,2**	**10,9**	**+2,9**	**94,4**	**94,4**	**0,0%**	**94,4**	**0,0%**
12°C	Vide	Non nébulisée	13,3		84,2		8,0						
		Nébulisée	**12,9**	**-0,4**	**95,6**	**+11,4**	**8,9**	**+0,9**					
	Chargée	Non nébulisée	14,3		71,7		7,3		94,8	94,7	-0,1%	94,5	- 0,3%
		Nébulisée	**12,2**	**-2,1**	**97,5**	**+25,8**	**8,7**	**+1,4**	**88,4**	**88,7**	**+0,3%**	**88,6**	**+0,2%**
2°C	Vide	Non nébulisée	6,0		82,1		4,8						
		Nébulisée	**5,9**	**-0,1**	**92,9**	**+10,8**	**5,4**	**+0,6**					
	Chargée	Non nébulisée	7,4		81,0		5,2		88,5	88,6	+0,1%	88,5	0,0%
		Nébulisée	**5,6**	**-1,8**	**95,3**	**+14,3**	**5,4**	**+0,2**	**88,9**	**89,0**	**+0,1%**	**88,8**	**-0,1%**

4. CONCLUSION

Cette étude expérimentale permet d'illustrer les potentialités du couplage d'un dispositif de nébulisation dans une vitrine réfrigérée verticale ouverte en termes de potentiel de rafraichissement et d'humidification de l'ambiance, et en termes de diminution de perte de poids des fruits et légumes entreposés. L'évaporation des gouttelettes d'eau sur la surface des produits réfrigérés augmente le transfert de chaleur et réduit la perte d'eau au cours de réfrigération. L'intégration de ce genre de dispositif dans une vitrine n'est pas triviale puisqu'il a été constaté que l'effet de refroidissement dépend de la température de l'air dans la vitrine directement corrélée à la température de consigne de refroidissement et à la zone de dépôt des gouttelettes d'eau. Des travaux supplémentaires sont encore nécessaires pour évaluer l'impact énergétique d'une vitrine réfrigérée nébulisée sur le fonctionnement du groupe frigorifique en termes de consommation énergétique et de cycles de dégivrage. De plus, d'autres essais doivent être réalisés prochainement sur des salades, produits plus sensibles que les tomates aux conditions environnantes du fait de leur teneur en eau et de leur coefficient d'échange évapo-transpiratif très élevés.

Ce travail est issu d'une étude doctorale intitulée « Étude et modélisation des processus d'humidification et de refroidissement évaporatif par mélange d'un brouillard d'eau dans un flux d'air » dont la soutenance est prévue en 2022. Cette thèse a été menée en étroite collaboration avec le centre PERSEE de l'Ecole MINES ParisTech, l'Université Côte d'Azur, l'Université Clermont-Auvergne et l'entreprise ARFITEC, dans le cadre d'une convention CIFRE.

Allais I. and Alvarez G. (2001). *Analysis of heat transfer during mist chilling of a packed bed of spheres simulating foodstuffs*. Journal of Food Engineering, 49(1):37–47.

Brown T., Janet E.L.C., et Stephen J.J. (2004). *Humidification of chilled fruit and vegetables on retail display using an ultrasonic fogging system with water/air ozonation*. International Journal of Refrigeration 27 (8): 862-68.

CTIFL. Merendet V., Annibal S., et Letang G. (2007). *Nébulisation et fraîcheur en rayon*. Infos CTIFL, (230):48–54.

Letang G. (1997). *La perte d'eau au cours de la réfrigération dans l'air des fruits et des légumes.* Ingénieries eau-agriculture-territoires, (11):41–50.

Ministère de la Transition écologique. (2021). Récupéré sur *https://www.ecologie.gouv.fr/gaspillage-alimentaire-0*. Accédé le 03 septembre 2021.

Moureh J., Letang G., Palvadeau B. et Boisson H. (2009). *Numerical and experimental investigations on the use of mist flow process in refrigerated display cabinets*, International Journal of Refrigeration, (32):203-219.

Norme NF EN ISO 23953-2. (2015). *Meubles frigorifiques de vente - Partie 2 : Classification, exigences et méthodes d'essai* , AFNOR, 104 p.