

Sur-Titre : Impact du froid sur la qualité des tomates

Titre : Projet FreshQualiTom, influence des conditions du circuit logistique sur le refroidissement

Auteurs : Laguerre O., Denis A., Duret S., Moureh J., Flick D., Mérendet V.

Mots clés : aptitude à la conservation en frais, durée de conservation, logistique, température de conservation

Les données clés à retenir

La deuxième action du projet FreshQualiTom vise à comprendre et déterminer l'influence des conditions de la chaîne logistique sur la température de la tomate : les pratiques de refroidissement et de stockage agissent-elles sur la baisse de qualité des tomates ? Les travaux expérimentaux menés ont montré que la température du produit, facteur déterminant pouvant impacter la qualité, varie selon sa position dans le colis et dans la palette. Un produit placé en périphérie de palette est plus sensible aux variations de température ambiante que celui placé au centre en raison des variations des échanges thermiques entre le produit et l'air. Comprendre ces échanges est donc nécessaire pour envisager des solutions techniques visant à minimiser l'effet potentiel du froid sur la qualité de produit.

The second action of the FreshQualiTom project aims to understand and determine the influence of the conditions of the supply chain on the temperature of tomatoes: do cooling and storage practices have a negative effect on tomato quality? The experimental work carried out showed that the temperature of the product, a determining factor that can impact quality, varies according to its position in the crate and on the pallet. Products placed on the periphery of a pallet are more susceptible to variations in ambient temperature than those placed in the centre because of variations in thermal exchanges between the product and the air. Understanding these exchanges is therefore necessary to consider technical solutions aimed at minimizing the potential effect of low temperatures on product quality.



Palette de tomates entreposée au stade de gros

Contexte de l'étude

La tomate, légume préféré des Français, est souvent source de déception gustative pour les consommateurs. Partant de l'hypothèse que les pratiques de refroidissement après récolte et de stockage inadaptées pourraient être à l'origine d'une baisse des qualités des tomates distribuées aux consommateurs, le projet FreshQualiTom vise à mieux comprendre les effets des différents facteurs pouvant influencer lors du circuit logistique de la filière tomate. INRAE et Groupe Filpack sont les partenaires de ce projet porté par le CTIFL. Quatre actions sont ainsi menées successivement afin de répondre à cette problématique.

Au cours de ce projet, il est d'abord prévu d'identifier les pratiques de conditions de stockage auxquelles sont soumises les tomates tout au long de la chaîne logistique, grâce à une enquête auprès des opérateurs et une étude de terrain (action 1 réalisée, voir Infos CTIFL n°388, janvier 2023). Des études expérimentales et numériques en laboratoire sont ensuite menées dans des conditions maîtrisées, représentatives de celles observées en circuit réel, pour une meilleure compréhension des échanges thermiques au sein de la palette et des colis (action 2). L'impact de ces conditions sur les qualités commerciales, organoleptiques et nutritionnelles des tomates seront parallèlement testées dans une troisième phase (action 3). Des solutions techniques existantes seront finalement évaluées afin de connaître leur effet sur la limiter des dégradations des tomates (action 4).

Cet article s'attache particulièrement à présenter les résultats de l'action 2 « Caractérisation de la distribution des températures dans une palette ».

Les objectifs de cette action sont d'étudier expérimentalement l'influence des vitesses de l'air réfrigéré et des pratiques des opérateurs de la filière sur la distribution de la température de tomates au sein d'une palette. Les différents effets des ajourages d'un colis, de l'épaisseur de la lame d'air au-dessus des tomates (espace libre dans un colis situé entre le haut des produits et le colis du dessus), de la présence de paille dans un colis et du filmage de la palette sont également évalués.

I. Méthodologie appliquée

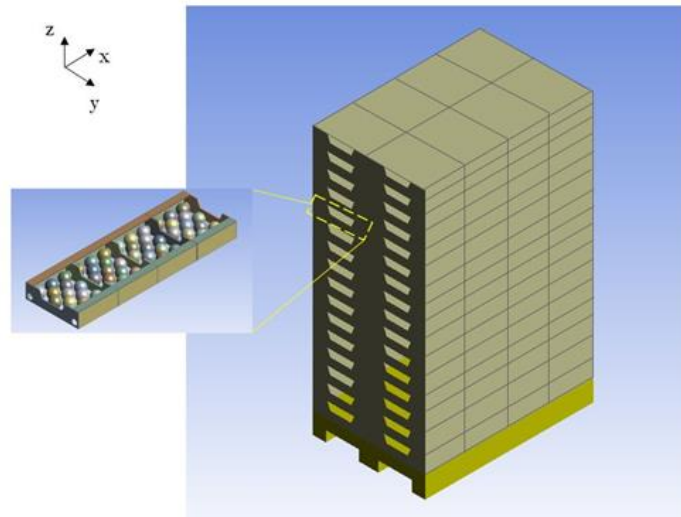
1.1. Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental a été mis au point en se basant sur la configuration d'une palette réelle (Figure 1a). Celui-ci est composé de 4 colis de dimensions 30 x 40 x 11 cm chacun permettant de représenter un demi-niveau d'une palette (Figure 1b) ; compte tenu du plan de symétrie, nous considérons que les résultats obtenus peuvent s'appliquer également à l'autre demi-palette. Ce dispositif peut représenter les niveaux intermédiaires d'une palette, c'est-à-dire tous les niveaux, sauf celui du haut et du bas. Pour simuler cette condition de répétabilité, deux plaques isolantes en polystyrène (épaisseur 4 cm chacune) sont placées en haut et en bas du dispositif au cours de l'expérimentation. Deux ventilateurs à débit variable sont installés à une extrémité du dispositif pour aspirer un écoulement d'air homogénéisé qui sera homogénéisé et stabilisé par l'effet d'un nid d'abeille fixé en amont de la veine d'air, facilitant ainsi l'interprétation des résultats. La Figure 1c présente le dispositif sans plaque isolante permettant de visualiser les dispositions des colis de tomates Cauralina et la Figure 1d présente les dimensions d'un colis. Ce dispositif est placé dans une cellule d'essai dans laquelle la température ambiante est contrôlée.

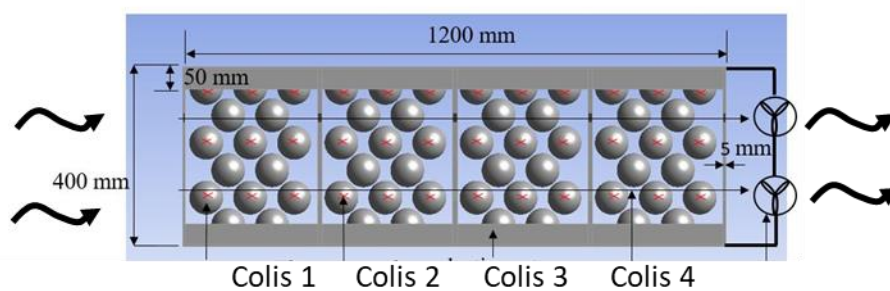
Deux types de produits ont été utilisés :

- Tomate Cauralina (diamètre moyen 88 mm, 12 tomates/colis, Fig. 1c) ; parmi le segment des tomates gustatives, cette variété de tomates est l'une des plus vendues en France.

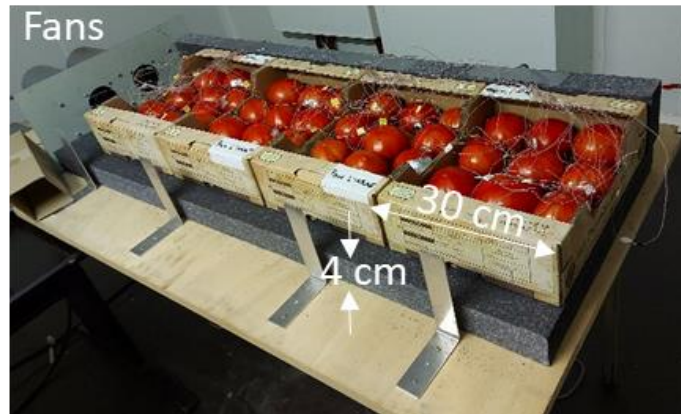
- Produit modèle : sphère en polyéthylène (diamètre externe 75 mm) remplie de gel de Carraghénane (Fig. 1d). En effet, les produits modèles sont mieux adaptés que le produit réel pour certains types d'expérimentation, notamment la mesure de vitesses d'air par LDV (Laser Doppler Vélocimétrie) qui est délicate à mettre au point et longue à réaliser. Les mêmes produits modèles sont utilisés tout au long du suivi.



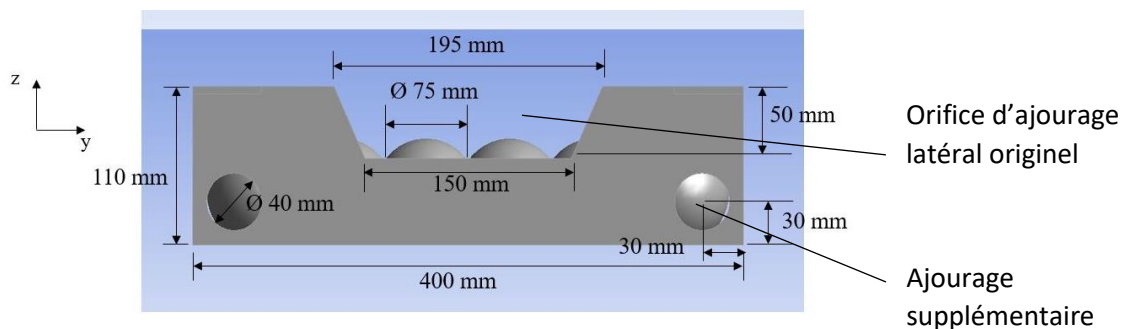
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1 : (a) Schéma d'une palette entière (b) Vue du dessus du dispositif expérimental représentant un niveau intermédiaire d'une palette (c) Photo du dispositif ouvert rempli des colis de tomates Cauralina (d) Schéma du long côté d'un colis classique avec orifice d'ajourage latéral et percé de 2 ajourages supplémentaires de 40 mm de diamètre, situés en zone inférieure sur les côtés (configuration 2). Les 3 dimensions de l'espace sont notées x,y,z.

Le dispositif a été testé avec six vitesses d'air ambiant variant de 0,15 m/s à 3,1 m/s, deux niveaux d'ajourage de colis (colis classique et colis avec ajourage supplémentaire), trois épaisseurs de lame d'air au-dessus des produits (5, 15 et 25 mm), avec et sans paille dans le colis, avec et sans filmage entourant les 4 colis.

Fig. 2 : Facteurs et modalités étudiées indépendamment les uns des autres

Facteurs de variation	Modalités étudiées
Vitesse d'air réfrigéré	6 vitesses : de 0,15 m/s à 3,1 m/s
Ajourage du colis	Présentation classique : colis 30 * 40 cm comprenant 2 orifices d'ajourage latéraux alignés (1 sur chacun des grands côtés du colis) Présentation classique avec en plus 4 perforations latérales (2 sur chacun des grands côtés)
Épaisseur de la lame d'air au-dessus des tomate (= hauteur de colis)	5, 15 et 25 mm
Fausse paille en papier dans le colis	Présence / absence
Filmage de la palette	Présence / absence

1.2. Mesure de température

Des thermocouples étalonnés (précision $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$) ont été placés à cœur, en surface de tomates Cauralina ou de produit modèle et dans l'air près du produit, à différentes positions dans le dispositif. Les températures ont été enregistrées toutes les 2 minutes à l'aide d'une centrale de mesure et l'expérience se terminait quand les températures atteignaient un plateau de température.

1.3. Mesure de vitesse d'air

La vitesse d'air à l'entrée et à la sortie du dispositif a été mesurée par un anémomètre à fil chaud (TESTO 435-4, plage de vitesse 0-20 m/s, précision $\pm 0,03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) et par une sonde LDV (Laser Doppler Vélocimétrie, Dantec FlowExplorer-2D, Figure 3a) à l'intérieur des colis. La mesure par LDV nécessite l'injection d'une fumée d'huile (diamètre $7 \mu\text{m}$) dans l'air à l'entrée. Celle-ci suit la direction de l'écoulement d'air et rend ainsi possible la mesure. Il faut noter que la mesure par LDV nécessite des colis transparents fabriqués en plexiglass pour permettre le passage du rayon laser. La Figure 3b présente trois rangées (R1, R2 et R3) dans chaque colis où les mesures ont été effectuées sur la section de passage d'air. Le laser était monté sur un système de déplacement automatique en deux directions (directions de l'écoulement x et de largeur du colis y) piloté par un logiciel.

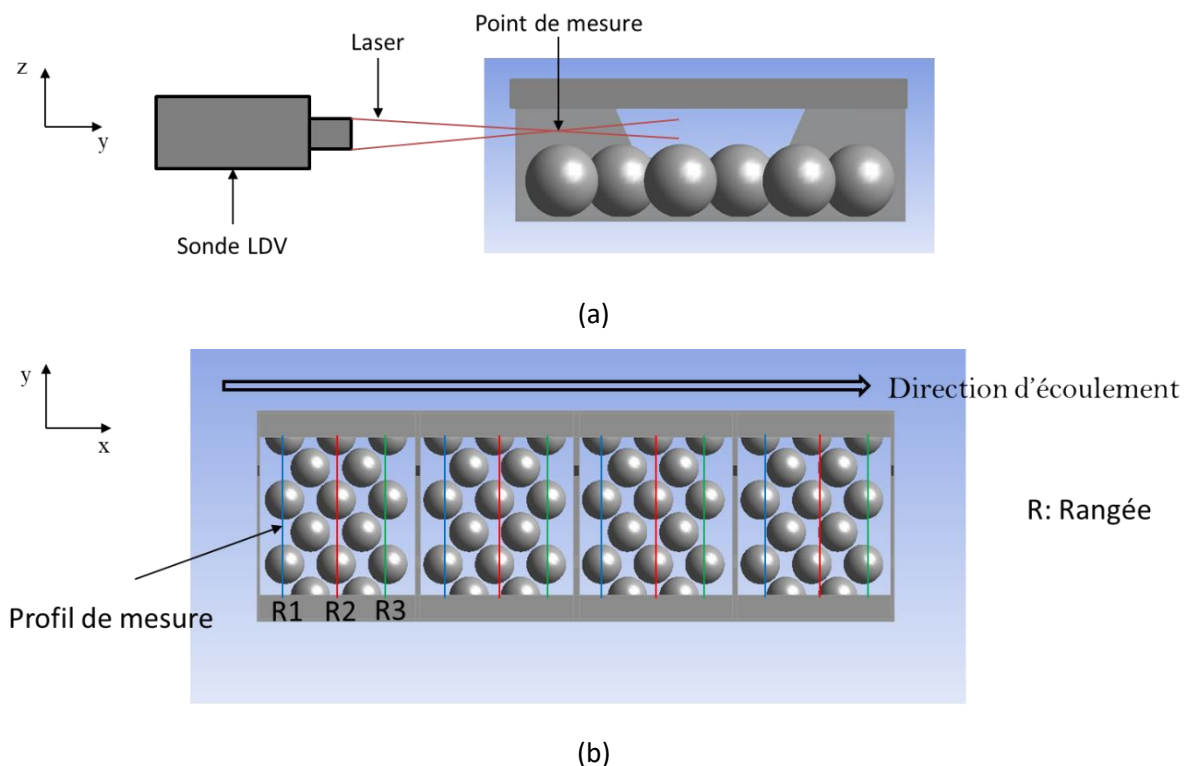


Fig. 3 : Position des mesures de vitesse d'air R1, R2 et R3 au-dessus de tomates par LDV (Laser Doppler Vélocimétrie) (a) Vue du profil (b) Vue du dessus.

II. Résultats et analyses

La température est présentée soit par une valeur absolue ($^{\circ}\text{C}$) soit par une valeur réduite T_c^* (sans unité), $T_c^*(t) = \frac{T_c(t) - T_a}{T_c(0) - T_a}$ qui varie entre 0 et 1. Il est à noter que $T_c(0)$ est la température initiale de tomate, $T_c(t)$ est la température de tomate à l'instant t et T_a est celle de l'air considérée constante au cours de l'expérience. L'intérêt d'utiliser T_c^* est de s'affranchir d'une légère différence de température initiale du produit et de l'air ambiant lors de différentes expériences.

Les temps de mi-refroidissement ($t_{1/2}$) et de 7/8^e de refroidissement ($t_{7/8}$) sont également utilisés pour comparer la vitesse de refroidissement de tomates exposées à différentes températures d'air. Le temps de mi-refroidissement ($t_{1/2}$) est défini comme le temps nécessaire pour permettre à la température réduite à cœur de tomate T_c^* d'atteindre 0,5. De la même manière, le temps de 7/8^e refroidissement ($t_{7/8}$) est le temps nécessaire pour permettre à la température à cœur réduite d'atteindre 0,13 (car $1 - \frac{7}{8} = 0,13$).

A titre d'illustration, la Figure 4a présente les résultats expérimentaux de l'évolution de la température à cœur de la tomate Cauralina la plus chaude (température initiale 19,5°C) située dans le colis 4 lors du refroidissement dans de l'air réfrigéré à 4,5°C (vitesse 2,2 m/s). La température à cœur de la tomate diminue progressivement et atteint environ 6°C après 6 h. La Figure 4b présente les mêmes résultats sous forme de température réduite. Quand la température réduite à cœur $T_c^*(t)$ atteint 0,5 (correspondant à la température absolue de 12,0°C) ; le temps de 1,9 h est appelé le temps de mi refroidissement. Quand la température réduite à cœur $T_c^*(t)$ atteint 0,13 (correspondant à la température absolue de 6,5°C), le temps de 6 h est appelé le temps de 7/8^e refroidissement.

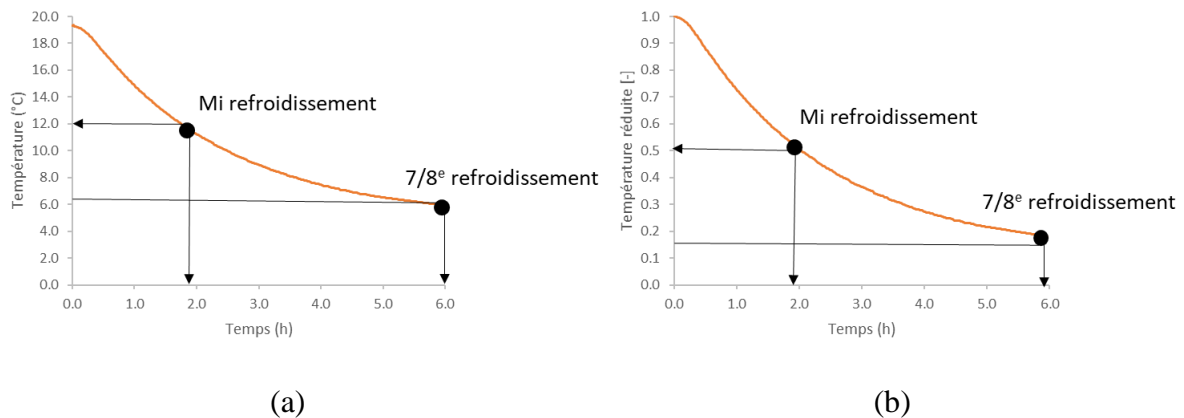


Fig. 4 : Illustration de la notion du temps de mi refroidissement et de 7/8^e refroidissement par l'évolution de la température à cœur de la tomate la plus chaude dans le colis 4 (a)- Température absolue (b)- Température réduite. Conditions expérimentales : tomate Cauralina (température initiale 19,5°C) exposée à de l'air à 4,5°C (vitesse de l'air de 2,2 m/s).

2.1. Distribution de températures

La Figure 5 présente les températures à cœur et en surface des tomates Cauralina ainsi que celles de l'air dans différentes positions des 4 colis. Les échanges convectifs entre l'air entrant à 4,5°C et les produits (initialement à 19,5°C) expliquent l'échauffement progressif du colis 1 au colis 4. Les résultats obtenus peuvent représenter la configuration d'une palette complète orientée dans un flux d'air où l'on constate que la position des tomates les plus chaudes se situe à l'arrière de la palette (colis 4). En effet, à mi-refroidissement (c'est-à-dire au bout d'1,9 h), la température à cœur de la tomate la plus chaude atteint 12°C tandis que celles des autres tomates sont légèrement plus basses. Cette figure montre une hétérogénéité de températures avec une moyenne à cœur des tomates de 11,3°C. Compte tenu des résistances thermiques à l'intérieur d'une tomate (par conduction) et à l'extérieur (par convection), $T_{\text{cœur}} > T_{\text{surface}} > T_{\text{air}}$. Les écarts constatés entre les températures à cœur des produits et celles de l'air à proximité sont de 1,8 à 5,0°C, alors que ceux-ci sont de 1,0 à 2,6°C entre la température de surface et celle de l'air à proximité.

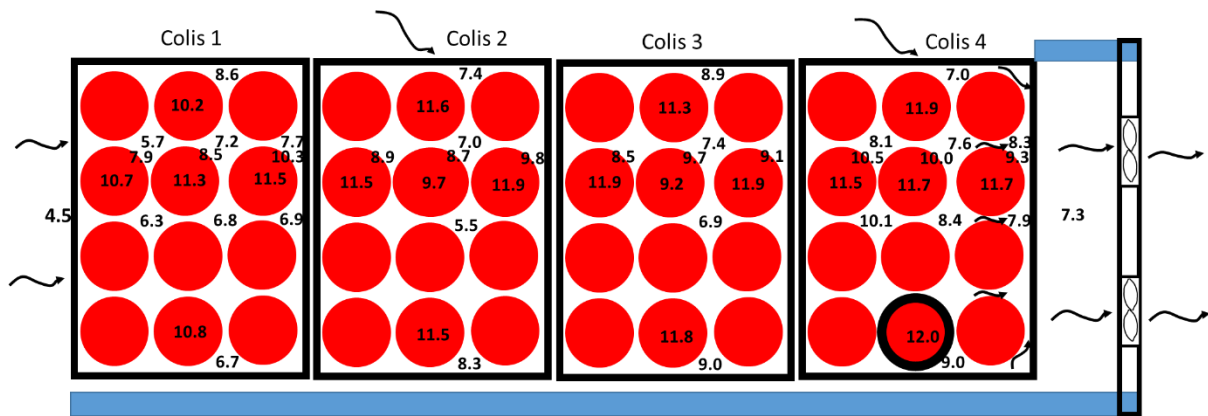


Fig. 5 : Distribution des températures à cœur (au centre des cercles rouges), en surface (sur le périmètre des cercles rouges) et de l'air (dans interstice) à mi-refroidissement des tomates Cauralina (température initiale 19,5°C) exposées à l'ambiance de 4,5°C à l'entrée du dispositif (vitesse de l'air de 2,2 m/s). La tomate la plus chaude (12,0°C) est encadrée en noir.

La température de l'air au centre d'un colis est plus faible que celle près des parois de 1 à 2°C ; ceci peut être expliqué par le passage préférentiel de l'air au centre du colis, en face de l'orifice d'ajourage latéral du colis classique, comme montré par les résultats de simulation (Figure 6). Cependant, le produit au centre de colis n'est pas toujours plus froid que celui près des parois, ce qui peut être expliqué par la complexité du circuit du flux d'air.

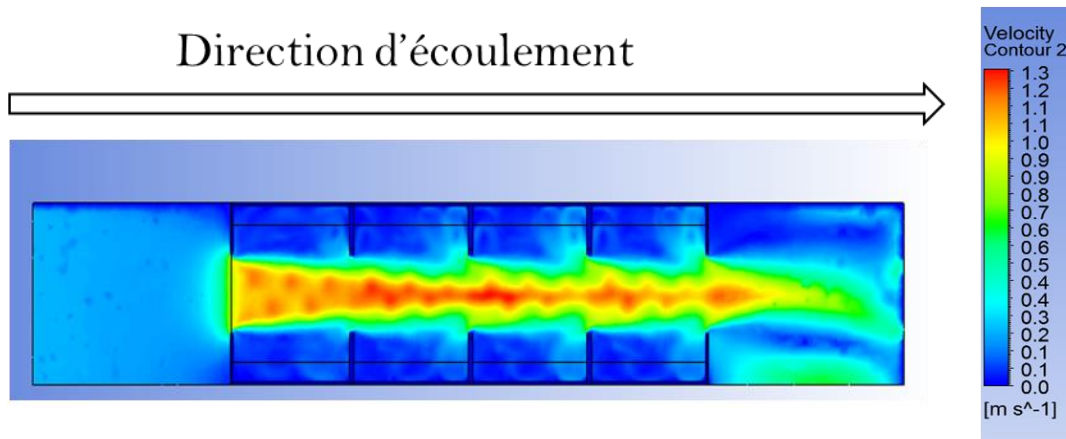


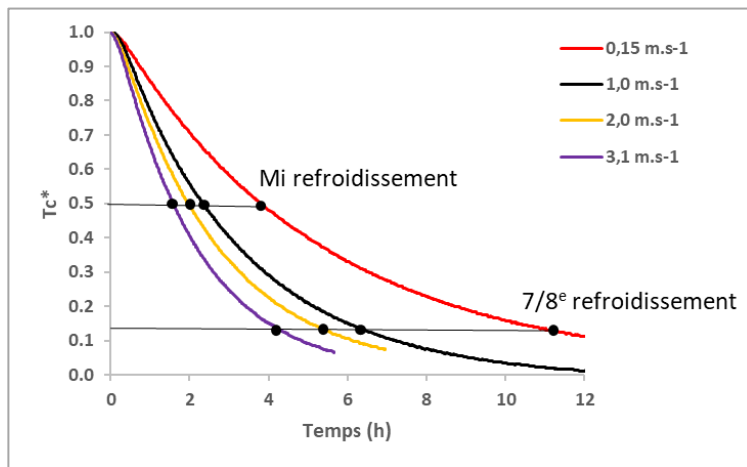
Fig. 6 : Résultats de simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) montrant le passage préférentiel de l'air au centre du colis en face de l'orifice d'ajourage (vue du dessus).

L'hétérogénéité de températures diminue au fur et à mesure de l'avancement dans le temps, les températures ont tendance à s'homogénéiser et se rapprocher de la température de l'air ambiant réfrigéré (4,5°C). Pour aboutir à un état proche de l'équilibre thermique et une quasi-stabilité des températures, on parle alors de temps de 7/8^e refroidissement. Dans ce cas-précis, il faudrait attendre 6 h et la température moyenne des tomates serait alors de 5,4°C et celle de la tomate la plus chaude de 6,5 °C.

2.2. Influence de la vitesse d'air

L'évolution de la température moyenne à cœur dans le colis 1 est présentée dans la Figure 7 pour une vitesse d'air variant de 0,15 m/s à 3,1 m/s (mesurée à l'entrée du dispositif). La vitesse de descente en température est très rapide au début, puis ralentit au fur et à mesure du temps pour devenir très lente : ce phénomène n'est pas linéaire, mais suit plutôt une évolution dite asymptotique. La température de la palette tend à se rapprocher de la température finale, mais n'y parvient pas.

L'influence importante de la vitesse de l'air sur la cinétique de refroidissement du produit s'explique par un meilleur échange entre l'air et le produit à des vitesses élevées. Cependant, l'augmentation de la vitesse au-delà de 2,0 m/s ne permet plus d'améliorer de manière significative la cinétique de refroidissement. En effet, pour atteindre la température de mi-refroidissement dans le cas d'étude (de 20 à 4,1°C, soit 12 °C ou $T_{c^*}=0,5$), il faudrait par exemple environ 4 h à 0,15 m/s, 2 h à 2 m/s et 1,8 h à 3 m/s. Pour atteindre la température de 7/8^e refroidissement (soit 6 °C ou $T_{c^*}=0,13$), il faudrait environ 11,5 h à 0,15 m/s ; 5,5 h à 2 m/s ou encore 4 h à 3 m/s.



Vitesse d'air	Temps de mi-refroidissement (T moy = 12 °C)	Temps de 7/8 ^e de refroidissement (T moy = 6°C)
0,15 m/s	4 h	11,5 h
1 m/s	2,5 h	6,5 h
2 m/s	2 h	5,5 h
3 m/s	1,8 h	4 h

Fig. 7 : Influence de la vitesse de l'air sur la cinétique de refroidissement des tomates Cauralina dans le colis 1 (température initiale de produit 20°C, température de l'air ambiant réfrigéré 4,0°C).

2.3. Influence du taux d'ajourage

Des mesures de température de produits modèles ont été réalisées dans deux configurations de colis. Le colis « classique » couramment utilisé en pratique est muni d'une encoche simple sur le long côté (appelé configuration 1) et ce même colis avec 2 ajourages supplémentaires de 4 cm diamètre de part et d'autre de la partie inférieure du long côté (configuration 2) (Figure 1d). La Figure 8 présente l'évolution de la température à cœur des tomates dans les deux configurations et elle montre une légère différence. Le temps de mi-refroidissement est de 1,6 h pour la configuration 1 et de 1,5 h pour la configuration 2. Cette amélioration très modérée de la vitesse de refroidissement peut s'expliquer par la position des orifices circulaires additionnels qui n'est pas très optimisée car les flux d'air issus de ces orifices peuvent être entrecoupés par les tomates situées en aval, malgré leur position à 1 cm des bords extérieurs du colis. Ces mêmes orifices plus excentrés et situés dans les coins des colis auraient certainement une meilleure efficacité en termes de ventilation et de refroidissement (situés à 0,5 cm des bords par exemple) ou bien encore une encoche latérale plus longue. Il faudrait dans ce cas vérifier la résistance mécanique des colis par rapport à la charge supportée lors de leur empalement.

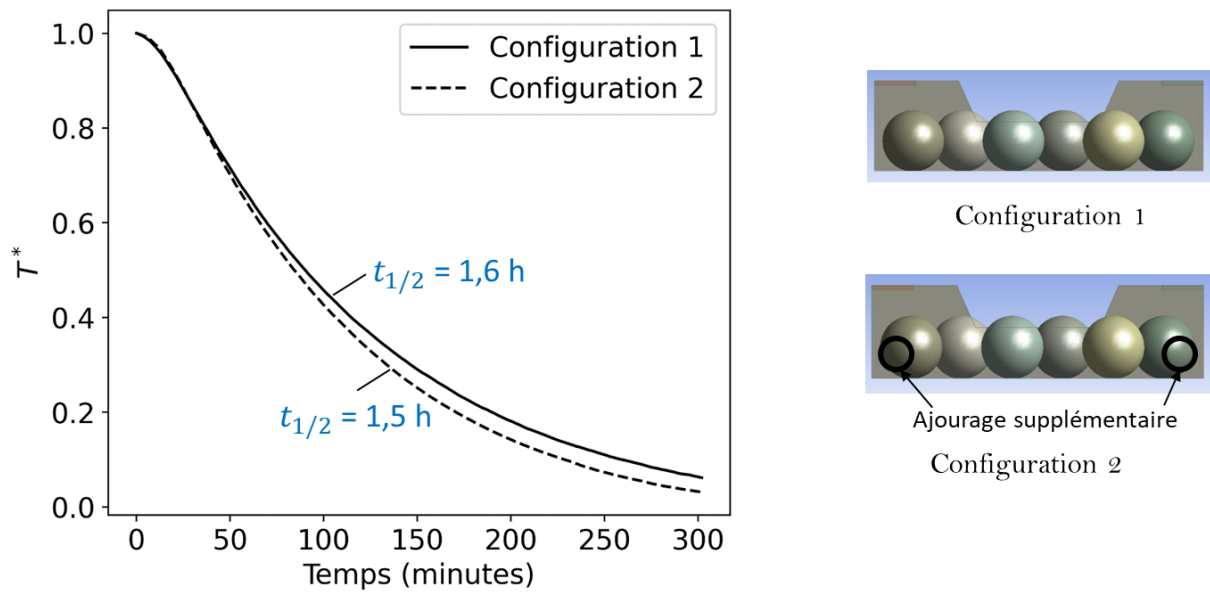


Fig. 8 : Comparaison du refroidissement de produits modèles dans un colis sans ajouage supplémentaire (configuration 1) et avec ajouage supplémentaire (configuration 2) pour une vitesse d'air en amont du colis de 0,2 m/s.

2.4. Influence de l'épaisseur de la lame d'air au-dessus des produits

On appelle 'lame d'air' l'espace entre le haut du produit et le haut du colis. Des essais avec une épaisseur de lame d'air de 5, 15 et 25 mm ont été réalisées en plaçant les produits modèles sur un faux-fond plat plus ou moins rehaussés dans des colis classique (configuration 1). Ces colis ont été exposés à une vitesse d'air en amont de 0,2 m/s, cette vitesse d'air faible permet de mieux observer les différences. L'évolution de la température moyenne à cœur de produit (moyenne de 4 colis) selon différentes épaisseurs de lame d'air, présentée dans la Figure 9, ne montre aucune influence de cette épaisseur sur la cinétique de refroidissement.

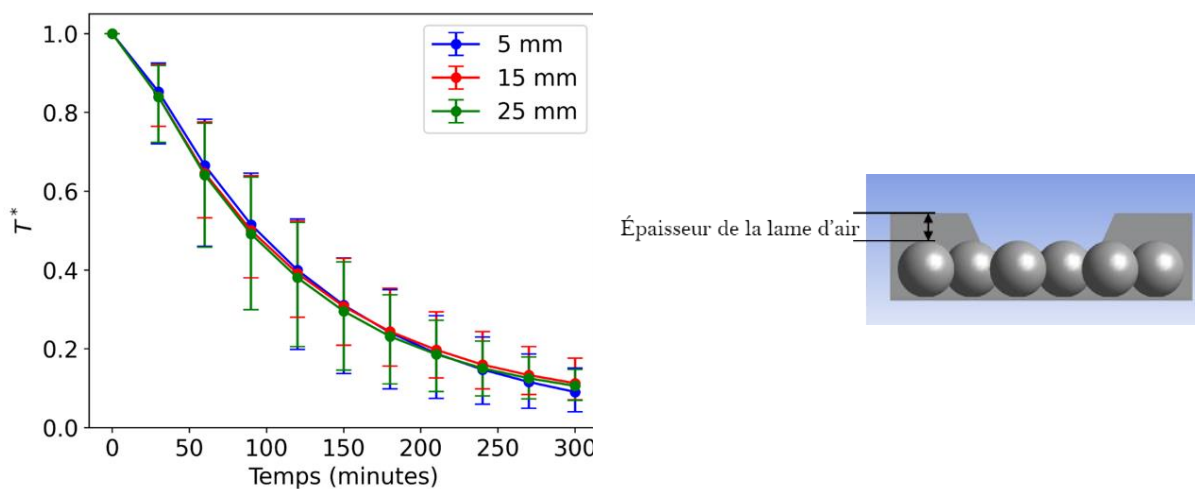


Fig. 9 : Cinétique moyenne de refroidissement de produits « modèle » rangés dans un colis classique sur un niveau de palette et avec des épaisseurs de lame d'air de 5, 15 et 25 mm (vitesse de l'air en amont du colis 0,2 m/s).

2.5. Influence de la présence de paille

Selon les pratiques commerciales, les tomates sont parfois déposées sur de la fausse paille pour mettre en valeur le produit. L'objectif de l'essai était ici d'évaluer si la présence de la paille était un obstacle à l'écoulement d'air et si cela pouvait avoir une influence sur la température du produit. Des expériences sur des produits modèles avec et sans paille dans les colis ont été réalisées et les résultats sont présentés dans la Figure 10. On constate une légère augmentation du temps de refroidissement qui passe de 1,6 h (sans paille) à 1,7 h (avec paille). Cette légère augmentation permet de conclure que la présence de la paille est un obstacle à l'écoulement d'air et rend plus difficile le refroidissement de produit. De plus, la présence de la paille augmente l'hétérogénéité de ventilation ($T^* (\max) - T^* (\min)$) représentée par des barres sur la Figure 9.

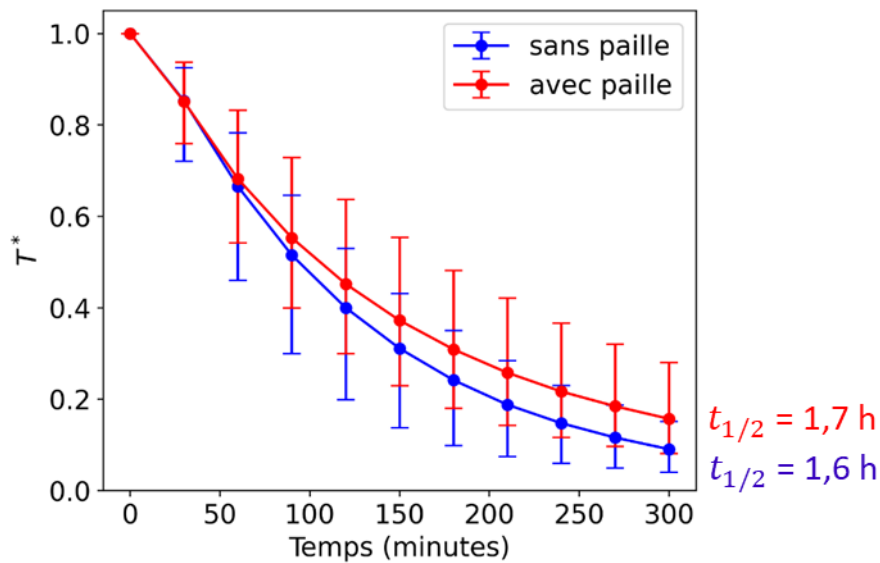


Fig. 10 : Cinétique moyenne de refroidissement sur un niveau de palette (vitesse d'air en amont du colis 0,2 m/s, produit modèle dans un colis classique sans ajourage supplémentaire).

2.6. Influence du filmage

Des expériences ont été réalisées en enveloppant entièrement le dispositif d'un film étirable en polyéthylène, avec des colis remplis de tomates Cauralina. Les évolutions de la température moyenne à cœur du colis 1 pour les modalités avec film et sans film, sont présentées dans la Figure 11. Les résultats montrent un ralentissement très significatif de la cinétique de refroidissement quand le dispositif est filmé ; le temps de mi refroidissement passe de 4 h sans filmage à 21 h avec filmage et le temps de 7/8^e refroidissement passe de 11 h sans filmage à plus de 48 h avec le film. En effet, le film bloque la circulation d'air dans les colis et les échanges convectifs entre le produit et l'air sont ainsi limités.

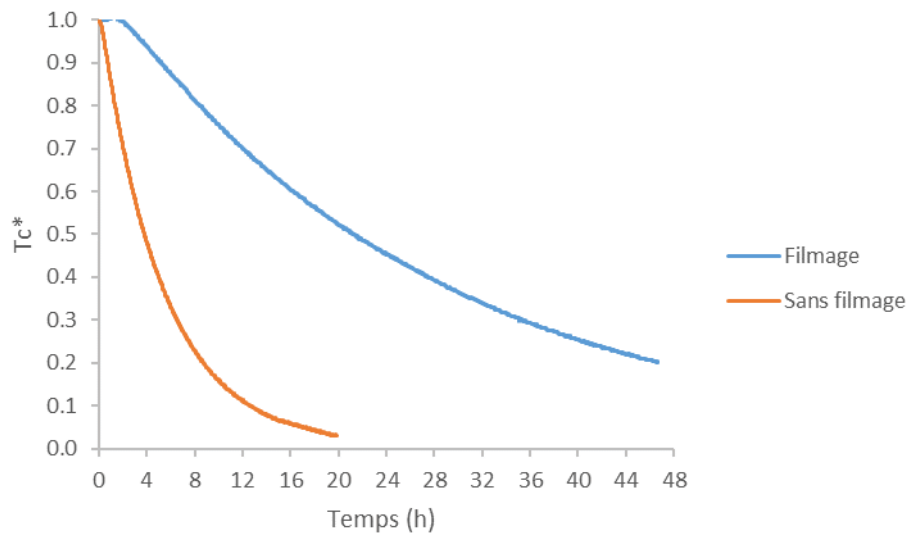


Fig. 11 Influence du filmage sur la cinétique de refroidissement de tomates Cauralina du colis 1.

2.7. Profil de vitesse d'air dans les colis

Des mesures de la vitesse d'air au-dessus des produits modèles, à trois niveaux (R1, R2 et R3) pour chacun des 4 colis et sur toute la largeur de colis, ont été réalisées par LDV (Figure 3b). Dans les 4 colis, il est constaté une vitesse élevée au milieu du colis c'est-à-dire en face de l'orifice d'ajourage latéral et des vitesses faibles sur les deux cotés près des parois (Figure 12). Ces résultats sont en accord avec les températures mesurées présentées sur la figure 5, le produit est plus froid au milieu et plus chaud près des parois latérales de colis.

Il est constaté également une influence significative de la vitesse de l'air en amont du colis sur la vitesse maximale au-dessus des tomates. Une vitesse plus élevée en amont (0,2 m/s contre 0,05 m/s) induit aussi une vitesse plus élevée au-dessus des tomates

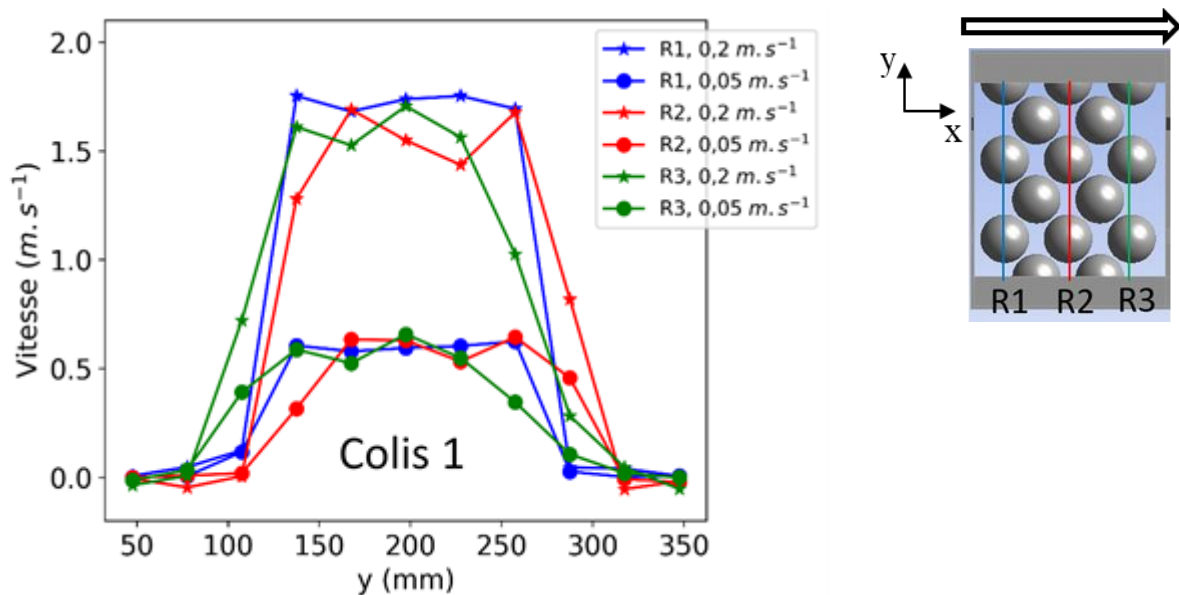


Fig. 12 : Influence de la vitesse d'air en amont du colis (0,05 m/s et 0,2 m/s) sur les profils des vitesses d'air suivant la largeur du colis (dimension y de l'espace 3D) et la profondeur (x) du colis.

2.8. Influence de la présence d'une palette voisine sur le profil de vitesse le long des palettes

Deux palettes, de hauteur 175 cm, espacées de 30 cm et positionnées l'une derrière l'autre, ont été placées dans une cellule d'essai. La mesure de vitesse d'air a été effectuée devant les orifices d'entrée des colis à différents niveaux de hauteur avec un anémomètre à fil chaud (Figure 13). Au premier niveau, à 20 cm du sol, la vitesse est un peu inférieure à celle du deuxième niveau à 40 cm. Ensuite, une légère diminution de la vitesse est mesurée en remontant, entre 40 et 175 cm de haut. Au niveau le plus haut, la vitesse augmente sensiblement car l'air circule dans l'espace libre au-dessus des palettes. La vitesse est nettement plus faible dans la palette située derrière la première, dans le sens du flux d'air en entraînant ainsi une baisse plus lente de la température dans cette palette.

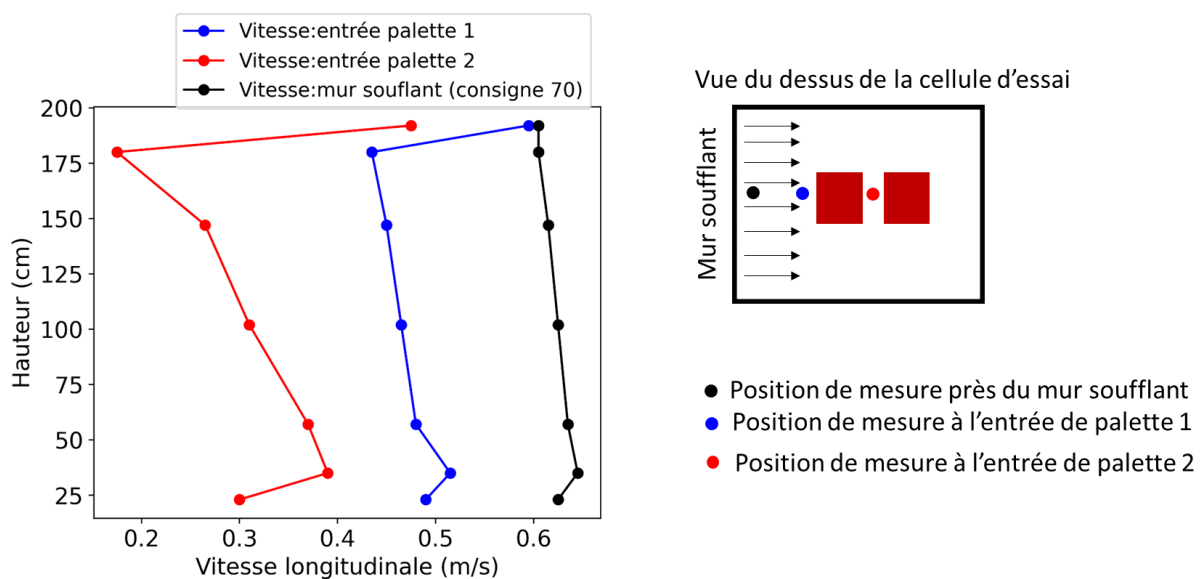


Figure 13 : Évolution de la vitesse d'air en fonction de la hauteur de la palette et de la distance du mur soufflant.

Conclusion et suite de l'étude

De nombreux paramètres influent sur la rapidité et l'homogénéité d'évolution des températures d'une palette, lors de changements des conditions d'ambiance au cours du circuit logistique. Les travaux menés par INRAE d'Antony ont permis de mettre en évidence une influence importante de la vitesse de l'air et du filmage de la palette et une influence faible du taux d'ajourage et de l'épaisseur de la lame d'air dans les colis. En effet, l'hétérogénéité de température est liée à l'hétérogénéité du flux d'air devant une palette (la vitesse de l'air varie avec la hauteur) et celle à l'intérieur des colis (passage préférentiel de l'air au centre en face de l'orifice d'ajourage).

Même si l'étude a été menée sur des colis de dimensions 30*40 avec encoches latérales, dans la configuration particulière de 8 colis par niveaux de palette (2 rangées de 4 colis), ces approches et

résultats peuvent en partie s'appliquer à la configuration des colis 40*60 avec encoche latérale (2 rangées de 2 colis par niveau de palette).

Le développement d'un modèle d'évolution de qualité des tomates en fonction des scénarios temps-température dans une chaîne logistique est en projet. Le succès de ce développement dépendra des résultats de mesure de plusieurs critères de qualité des tomates réalisés au CTIFL. En 2021-2022, une campagne de mesures a été menée pour évaluer les qualités physico-chimiques et sensorielles de quatre variétés de tomates conservées dans différentes chambres d'essai pour simuler diverses conditions de circuit logistique (action 3 du projet). Ces résultats feront l'objet d'un prochain article.

A retenir (principaux résultats)

Dans une palette la température est hétérogène et le niveau d'hétérogénéité est influencé par les conditions (température, ventilation) du circuit logistique et les pratiques des opérateurs.

Les différents travaux expérimentaux menés par INRAE d'Antony ont mis en évidence l'importance de la vitesse de l'air dans les échanges thermiques :

- Augmenter la vitesse d'air en amont de colis permet de refroidir les produits plus vite et d'homogénéiser leur température. Cependant, au-delà d'une vitesse seuil (2,2 m/s), l'augmentation de vitesse ne permet plus d'améliorer d'une manière significative la cinétique de refroidissement. La vitesse de l'air n'est pas homogène sur la largeur d'un colis ; elle est nettement plus élevée au milieu (en face de l'orifice d'ajourage latéral) que sur les côtés, où l'air est bloqué par les rebords du colis. Il se crée un « couloir » de diffusion préférentiel de l'air au centre, du fait de l'alignement de ces ajourages entre les 4 colis de la palette. L'air diffuse plus difficilement sur les côtés.
- La vitesse de l'air est hétérogène suivant la hauteur de la palette : les colis du dessus non protégés sont ceux qui subissent les vitesses les plus importantes.

Concernant les dispositifs de colisage testés, il est ressorti que :

- L'épaisseur de la lame d'air au-dessus des produits (de 0,5 à 2,5 cm) n'a pas d'influence sur la rapidité de refroidissement des produits. La présence de fausse paille et le filmage ont en revanche un effet négatif sur la descente en température. Le filmage bloque la circulation de l'air dans la palette. Pour atteindre 12°C, les produits initialement à 20°C placés dans une ambiance à 4,1°C, mettent en moyenne 17 h de plus à se refroidir avec un film que ceux dans les colis non filmés.
- Dans les conditions expérimentales testées, l'augmentation du taux d'ajourage et le filmage ne permettent pas d'améliorer l'homogénéité de la température des produits.

Publication en lien avec cet article :

Laguerre O., Denis A., Bouledjeraf N., Duret S., Derens Bertheau E., Moureh J., Aubert C., Flick D., 2022, Heat transfer and aroma modeling of fresh fruit and vegetable in cold chain: case study on tomatoes, International Journal of Refrigeration, 133, 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.10.009>

Agyeman E.K.K., Duret S., Flick D., Laguerre O., Moureh J. Computational Modelling of Airflow and Heat Transfer during Cooling of Stacked Tomatoes: Optimal Crate Design. *Energies*, 2023, 16, 2048. <https://doi.org/10.3390/en16042048>

Article FreshQualiTom n° 1 – E. Derens et S. Annibal, janv. 2023 Infos CTIFL