



HAL
open science

Evaluation de la condensation à la surface de produits lors des ruptures de la chaîne du froid

Steven Duret

► **To cite this version:**

Steven Duret. Evaluation de la condensation à la surface de produits lors des ruptures de la chaîne du froid. [Rapport de recherche] INRAE TRANSFORM. 2021. hal-03824471

HAL Id: hal-03824471

<https://hal.science/hal-03824471v1>

Submitted on 21 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Nom du porteur du projet	Steven Duret
Codique de l'unité et intitulé	1460 – Génie des procédés frigorifiques pour la sécurité alimentaire et l'environnement (FRISE)
Défi concerné	Défi 1 : Conception raisonnée de la qualité des aliments et des bioproduit
Action concernée (facultatif)	Action 4 : Elaborer des approches et des outils pour raisonner la qualité selon une logique de multi-performances
Titre du projet	Evaluation de la condensation à la surface de produits lors des ruptures de la chaîne du froid
Acronyme du projet	Humicold
Période couverte	Bilan final (1 janvier 2020 – Septembre 2021)

Rappel de votre hypothèse de départ :

Du fait de la logistique complexe dans la chaîne du froid, des ruptures de température peuvent se produire avec un impact sur la sécurité et la qualité organoleptiques des produits alimentaires. Ces ruptures peuvent survenir suite à des pannes d'équipements mais aussi lors du transfert entre deux équipements, où le produit est parfois mis en attente dans une ambiance « chaude » (quai de déchargement par exemple). Il en résulte que la vapeur d'eau contenue dans l'air se condense à la surface des produits alimentaires. L'eau condensée peut ensuite persister car les aliments, après la rupture, sont à nouveau placés dans une ambiance froide à forte hygrométrie, limitant les phénomènes d'évaporation. L'eau issue de la condensation peut alors favoriser la croissance des flores microbiennes. Il est donc important de considérer à la fois la condensation lors d'une rupture et l'évaporation après une rupture lorsque le produit est replacé dans une ambiance froide.

De plus, du fait de l'hétérogénéité des températures de la surface des produits, de la température et de l'humidité de l'air dans les équipements frigorifiques, l'hypothèse que nous souhaitons vérifier dans ce travail est que l'eau s'évapore pendant la phase de refroidissement et se condense à nouveau sur d'autres produits, menant ainsi à de longues périodes d'humectation de la surface des produits et contribuant au développement de moisissures.

L'objectif du projet est de développer une méthodologie expérimentale et numérique permettant de d'évaluer la masse d'eau condensée sur les aliments lors de ruptures et du stockage dans la chaîne du froid.

Vos faits marquants

- **Etat de l'art**

La première étape des travaux menés dans le cadre du projet a été de réaliser une étude bibliographique afin de préciser le cadre des travaux à mener pendant le projet. La recherche bibliographique a montré l'existence de travaux sur la condensation dans les emballages des produits alimentaires (Linke and Geyer 2013, Bovi et al. 2016, Bovi et al. 2019, Jalali et al. 2019), sur l'évaporation de l'eau sur les surfaces dans l'industrie agro-alimentaire (Lecoq et al. 2014), sur la

formation de glace à la surface des produits surgelés due aux fluctuations de température (Urquiola et al. 2017) et sur le transport de l'humidité et la condensation dans les bâtiments (Yilmaz 2020). Cependant peu de travaux ont été publiés sur la condensation et l'évaporation de l'eau sur les produits alimentaires non emballés due à des changements de température et d'humidité de l'air environnant (Gottschalk et al. 2007). De plus, l'étude citée a étudié sur un produit unique à l'air libre où la convection naturelle est le mode de transfert dominant et non sur un empilement de produits de type cagette ou palette à vitesse d'air maîtrisée et en convection forcée.

- **Méthodologiques**

1. **Mise au point d'un dispositif expérimental** permettant de simuler les ruptures thermiques et hydriques (Figure 1). La difficulté technique principale est de changer rapidement (<60 s) la température ambiante où le produit est exposé tout en mesurant en continu la température et l'humidité de l'air ainsi que la masse des produits. La température est mesurée par des thermocouples de type T (+/-0.2°C), l'humidité par des hygromètres capacitifs HMP 110 (Vaisala - +/-2.5%HR). Le dispositif permet de faire contrôler la vitesse de l'air (0.2 – 1m/s), la température (0°C à 35°C) et l'hygrométrie (30% à 100% selon la température). La masse de 2 produits en suspension (un en amont et un en aval) est mesurée par des balances OHAUS (capacité de 10,1kg et précision 10 mg). Le haut et le bas du dispositif sont isolés par une plaque en polystyrène, ainsi, il représente un niveau intermédiaire de palette. Un ventilateur à vitesse contrôlée permet d'aspirer de l'air circulant dans le dispositif, ainsi, les écoulements sont unidirectionnels et stables. Un produit seul ou plusieurs produits en alignement peuvent être placés dans le dispositif.

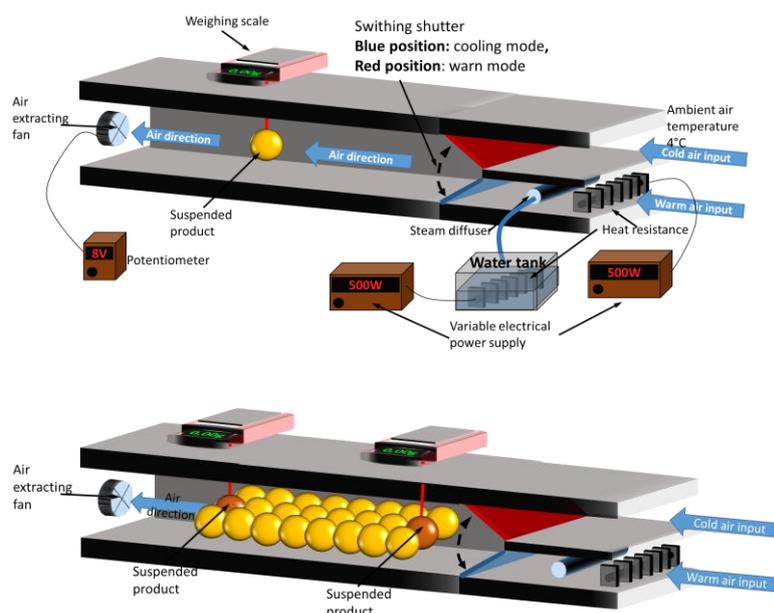


Figure 1 : Schémas simplifiés du dispositif expérimental pour un produit seul et pour plusieurs produits

2. **Développement de modèles simplifiés**

Une démarche de modélisation à complexité croissante a été mise en place pour simuler les différentes configurations étudiées dans ce projet.

Le premier modèle, le plus simple permet de prédire la température et la masse d'eau présente à la surface d'une sphère en aluminium. Ce cas est simple car on peut considérer que la température du

produit est homogène du fait de la grande conductivité de l'aluminium ($Biot = hS/\lambda \ll 0.1$). Le modèle a été validé par les mesures pour toutes les configurations étudiées.

Le second modèle permet de prédire la température (cœur et surface) et la masse d'eau présente à la surface d'un produit réel. Dans ce cas, la température du produit est hétérogène, le modèle est donc plus complexe et la température a été modélisée par la méthode des différences finies en 1D (Sphérique, schéma centré explicite).

Le troisième modèle consiste à modéliser un niveau de palette en couplant une approche dite zonal pour le calcul de la température et de la teneur en eau de l'air à différentes positions dans la palette avec le second modèle décrit ci-dessus pour la prédiction de la température des produits (cœur et surface) et la masse d'eau à la surface des produits. En effet, la température et l'humidité de l'air ainsi que celle de produit changent progressivement en traversant le dispositif dû aux échanges thermique et hydrique entre l'air et le produit.

Difficultés rencontrées

- Du fait du retard lié aux confinements lors de la construction du dispositif lors de la première année du projet, toutes les configurations n'ont pas pu être validées par l'expérimentation.
- La maîtrise de l'humidité et de sa mesure sont délicates du fait de l'inertie du dispositif et du temps de réponse (du également à leur inertie) des hygromètres. Pour résoudre ces problèmes, le système (résistance et diffuseur de vapeur) doit être mise route au moins 1 heure avant l'expérience pour atteindre l'équilibre et un dispositif de préchauffage et d'évacuation de l'air pendant cette période a été ajouté. Une solution technique a été trouvée et a permis de réduire à quelques dizaines de secondes l'équilibre du système et des hygromètres. Cependant, une incertitude au début des changements brusques subsiste et peuvent impacter la qualité des mesures et les prédictions des modèles.
- Les deux premiers modèles ont montré de bons résultats pour prédire l'évolution des températures et des masses d'eau en fonction de température et humidité de l'air ambiant. Toutefois pour la prédiction de la masse d'eau, des essais complémentaires sont nécessaires afin de valider le modèle de la palette.

- **Résultats et discussion**

1. Première configuration : une sphère en aluminium – température homogène

La figure 2 montre l'évolution des températures d'un produit prédite et mesurée, de la masse de produit et de la concentration de vapeur dans l'air pendant une rupture de 30 min au cours de laquelle la température de l'air passe de 4°C à 25°C (55% HR) et pendant son refroidissement de 30 min de 25°C à 4°C (80%HR). Le modèle prédit bien à la fois la température du produit (considéré homogène dans ce cas précis) et la masse d'eau condensée à la surface du produit. La quantité d'eau condensée augmente rapidement au début de la rupture (de 0 à 20 min) du fait du grand écart entre la concentration de vapeur dans l'air et la concentration de vapeur saturante à la température de surface. Le débit d'eau condensée diminue à mesure que le produit chauffe et que l'écart entre les concentrations de vapeur diminue. L'eau commence à s'évaporer (à 20 min) lorsque la concentration de vapeur à la température de surface dépasse la concentration de vapeur de l'air puis s'évapore rapidement lorsque le produit est placé dans une ambiance froide.

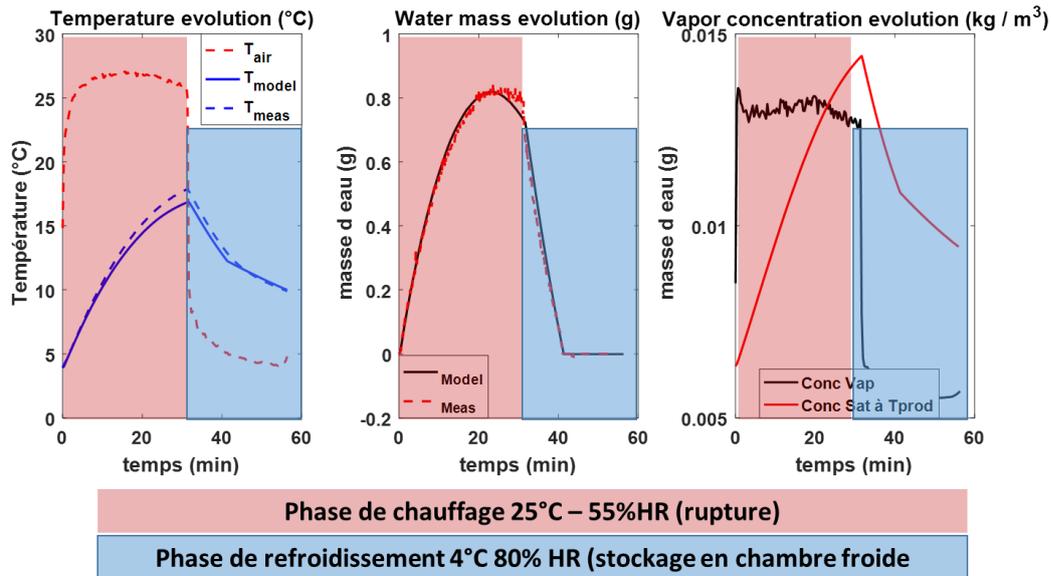


Figure 2 : Evolution des températures, de l'évolution de la masse et de la concentration de vapeur lors de l'exposition d'une sphère en aluminium (Température initiale = 4°C) à un air chaud (25°C – 55%HR) pendant 30 min puis lors de son refroidissement (4°C – 80%HR)

2. Deuxième configuration : un produit réel (orange, diamètre 7 cm)– température hétérogène au sein de produit

Dans cette configuration, la température du produit n'est plus homogène, le modèle prédit la température à cœur et la température de surface. Toutefois, le modèle considère la température homogène sur toute la surface du produit alors que les mesures à 3 positions sur la surface montrent que la température de la surface est hétérogène (Figure 3). En conséquence, la prédiction de la masse d'eau condensée est assez éloignée des mesures. L'hypothèse émise est que du fait de la température hétérogène de la surface du produit, l'eau s'évapore d'un côté du produit et condense de l'autre côté du produit.

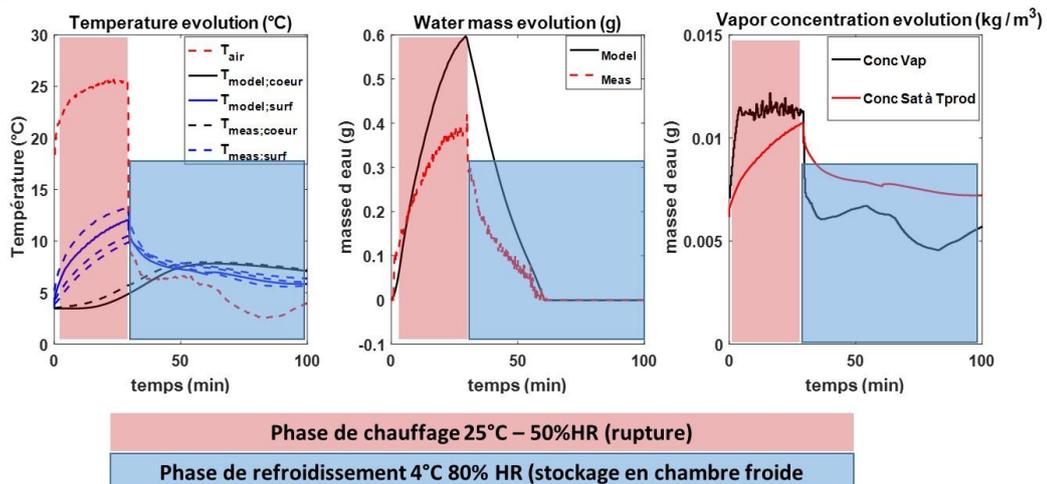


Figure 3 : Evolution des températures, de l'évolution de la masse et de la concentration de vapeur lors de l'exposition d'une orange (Température initiale = 4°C) à un air chaud (25°C – 50%HR) pendant 30 min puis lors de son refroidissement (4°C – 80%HR)

Pour vérifier cette hypothèse (phénomène d'évaporation et de condensation simultanés sur le même produit), la même expérience a été réalisée à une hygrométrie plus grande (80% au lieu de 50%)

pendant les 30 min de rupture afin d'assurer que la concentration de vapeur de l'air soit supérieure à la concentration de vapeur saturante à la température de surface sur toute la surface du produit (Figure 4).

On observe que lorsque la concentration de vapeur de l'air est bien supérieure à la concentration de vapeur saturante à la température de surface du produit, le modèle prédit correctement la quantité d'eau condensée à la surface. Cela montre que dans des conditions d'hygrométrie modérée, l'hétérogénéité de la température de surface induit des phénomènes simultanés de condensation et d'évaporation de l'eau à la surface d'un même produit.

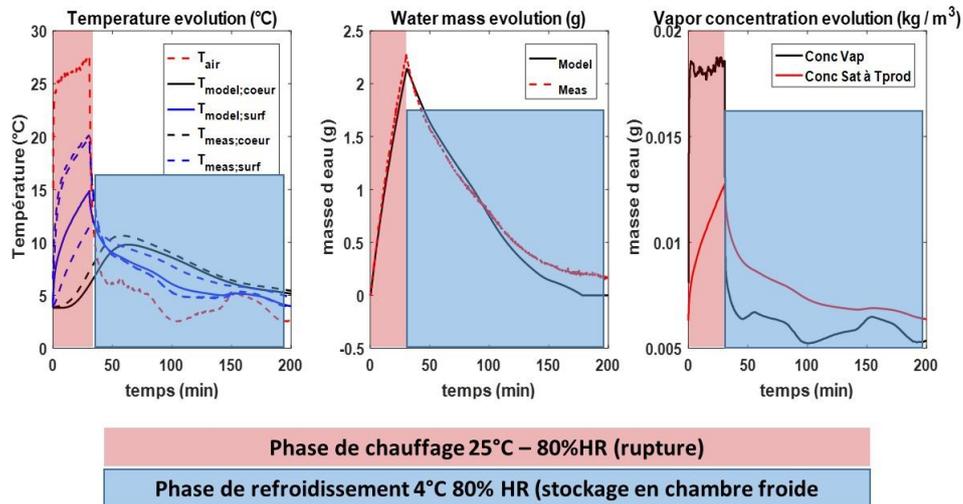


Figure 4 : Evolution des températures, de l'évolution de la masse et de la concentration de vapeur lors de l'exposition d'une orange (Température initiale = 4°C) à un air chaud (25°C – 80%HR) pendant 30 min puis lors de son refroidissement (4°C – 80%HR)

3. Troisième configuration : Alignement de produits réels (oranges).

Dans cette configuration, les produits disposés en 8 rangées de 3 ont été soumis à des ruptures de température. La figure 5 montre que l'eau se condense rapidement sur le produit en amont et commence à s'évaporer à mesure que sa température augmente. La quantité d'eau condensée sur le produit situé en aval augmente plus lentement. Toutefois, on constate que lorsque l'eau commence à s'évaporer du produit situé en amont, l'eau continue de se condenser sur le produit situé en aval.

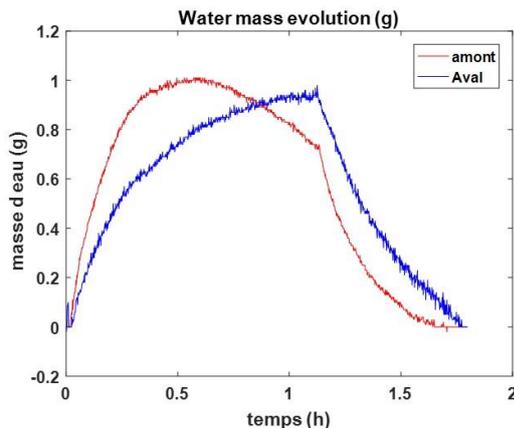


Figure 5 : Evolution de la masse d'eau mesurée sur des produits situés en amont (rouge) et en aval (bleu) d'un écoulement lors d'une rupture (T_{air} augmente de 4°C à 25°C, HR constante à 80%).

Le modèle décrivant cette configuration a été développé mais n'a pas pu être validé par ces expérimentations car des essais supplémentaires sont nécessaires pour pouvoir expliquer les

différences entre les mesures et le modèle. L'hypothèse principale avancée à ce stade pour expliquer les différences observées est que les coefficients d'échange thermique et massique entre l'air et les produits dépendent de leur position dans le dispositif. La comparaison de résultats expérimentaux et modèle sera effectuée ultérieurement. Cependant, à titre d'exemple, quelques scénarios de la chaîne du froid ont été simulés avec le modèle développé.

4. Scénarios de la chaîne du froid testés par la modélisation

Le modèle permet de calculer la température des produits, la température et l'hygrométrie de l'air ainsi que la masse d'eau sur les produits. Dans le cas présenté ici, une demi-palette (3 caquettes) a été modélisée, cette demi-palette a été divisée en 18 zones (Figure 6). Pour chaque zone, il est possible d'obtenir l'évolution de la température de l'air et des produits, l'hygrométrie et l'évolution de la masse d'eau sur leur surface en fonction de la température et de l'hygrométrie de l'air à l'entrée de la palette.

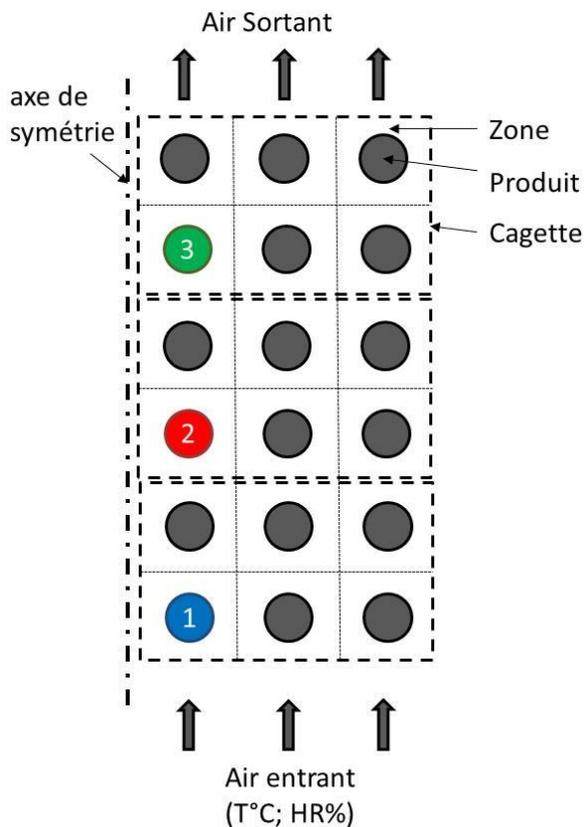


Figure 6 : Schéma de la demi-palette modélisée, les résultats des produits 1, 2 et 3 seront présentés par la suite.

Différents scénarios ont été testés :

Le premier scénario représente une palette initialement à 4°C exposée à un air chaud et humide (T=25°C, HR =60%) pendant 30 min, puis replacée dans une ambiance à 4°C et 90%HR. Sur les courbes ci-dessous (Figure 7), on peut observer l'évolution de la température de 3 produits à différentes positions dans la palette. On peut observer que la rupture a un impact assez important sur la température du produit 1 et peu d'impact sur les produits 2 et 3. En revanche, on observe que l'eau condensée persiste jusqu'à 5.5h sur le produit 3. L'eau qui s'évapore du produit 1 après la rupture se condense à nouveau sur le produit 3 en aval de l'écoulement.

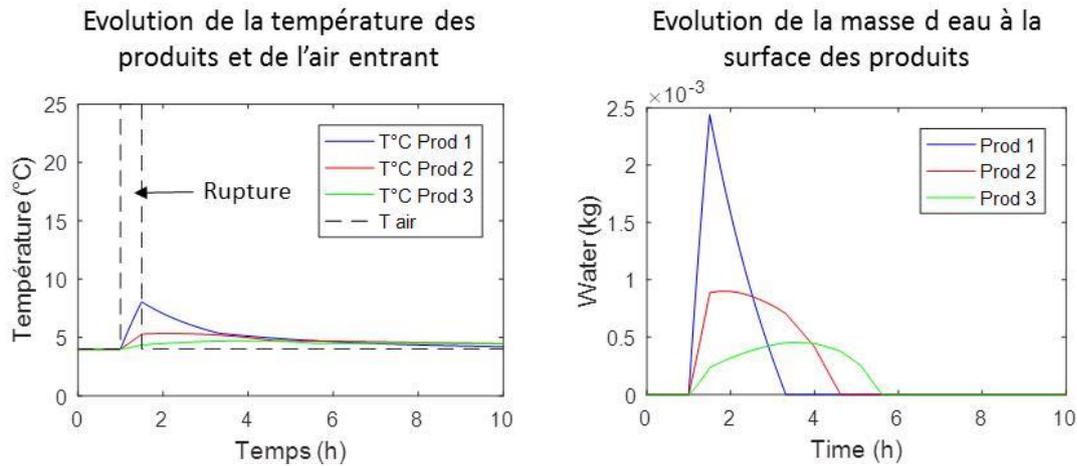


Figure 7 : Evolution de la température et de la masse d'eau condensée dans le scénario 1 (Rupture de 30 min à 25°C, 60%HR, puis stockage à 4°C 90 %HR).

Dans le scénario 2 les produits sont initialement à 4°C et sont ensuite chargés dans un équipement à 6°C et 90% (Figure 8). Par rapport au scénario 1, l'eau condensée est environ 10 fois moins importante, cependant, l'eau peut persister pendant de longues période selon les positions. En effet, le produit est initialement à 4°C et sa température est inférieure à la température de rosée de la deuxième ambiance ($T_{air}=6°C$, $HR=90\%$, $T_{rosée}=4.5°C$). L'air se refroidissant au contact des produits en amont de la palette, les produits situés en aval se réchauffent lentement et restent à une température inférieure à la température de rosée de l'air environnant pendant une longue période.

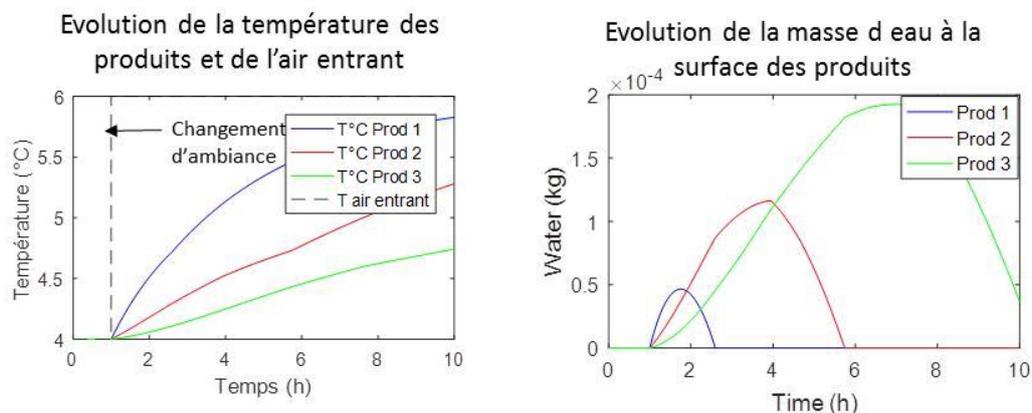


Figure 8 : Evolution de la température et de la masse d'eau condensée dans le scénario 2 (Changement d'un équipement à 4°C vers un équipement à 6°C 90%HR)

Publications

Une première publication est en cours de rédaction pour les deux premières configurations (produit seul). La soumission est prévue pour la fin 2021 au Journal of Food Engineering.

Un deuxième article sur le modèle zonal représentant un niveau de palette sera rédigé pendant le premier semestre de l'année 2022. Le journal reste encore à identifier.

- **Collaboratifs**

Les travaux réalisés ont contribué au développement d'une collaboration avec le CTIFL. La condensation est en effet un problème pour la filière des fruits et légumes est en effet. Ainsi nous avons eu une première discussion avec *Valérie Mérendet (CTIFL - Direction Recherche, Innovation et Expertise - équipe Légumes)* qui souhaite suivre les travaux futurs de l'unité FRISE sur cette thématique. Un premier contact a également été entrepris avec *Sébastien Lurol (Direction Recherche, Innovation et Expertise - équipe Fruits)*, une première réunion d'échange aura lieu le 5 Octobre. Ces contacts souhaitent participer au projet ANR JCJC en cours de montage par Steven Duret.

- **En perspectives**

Les nouvelles questions de recherche issues du projet, ce qui reste à traiter

- Etude de la nature de la surface des produits sur la densité des points de nucléation et sur les cinétiques de condensation et d'évaporation (Surface lisse / Surface rugueuse /Surface duveteuse)
- Etude de l'impact de la nature des surfaces sur les transferts thermique et massique dans un milieu macroporeux à deux températures
- Impact du type de litage (alvéoles plastique/carton, paillage) sur les cinétiques de condensation et d'évaporation, et sur les qualités des produits (développement des moisissures / pertes de masse)

Pour répondre à ces questions de recherche, Il est prévu de déposer un ANR JCJC en octobre 2021.

Avis du directeur d'unité

Avis sur la demande :

.....

Priorité DU : ...

Date : ...

Nom du DU : ...

Références Bibliographiques :

Bovi, G. G., O. J. Caleb, M. Linke, C. Rauh and P. V. Mahajan, 2016. Transpiration and moisture evolution in packaged fresh horticultural produce and the role of integrated mathematical models: A review. *Biosystems Engineering*, 150,(24-39).

Bovi, G. G., O. J. Caleb, C. Rauh and P. V. Mahajan, 2019. Condensation regulation of packaged strawberries under fluctuating storage temperature. *Packaging Technology and Science*, 32,(11), 545-554.

Gottschalk, K., M. Linke, C. Mészáros and I. Farkas, 2007. Modeling Condensation and Evaporation on Fruit Surface. *Drying Technology*, 25,(7-8), 1237-1242.

Jalali, A., G. Rux, M. Linke, M. Geyer, A. Pant, S. Saengerlaub and P. Mahajan, 2019. Application of humidity absorbing trays to fresh produce packaging: Mathematical modeling and experimental validation. *Journal of Food Engineering*, 244,(115-125).

Lecoq, L., D. Flick, A. Plana Fattori and O. Laguerre (2014). Characterization of evaporation rate, temperature, velocity and humidity fields in a cold chamber. 3rd IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain, ICCO 2014, London, France, International Institute of Refrigeration.

Linke, M. and M. Geyer, 2013. Condensation dynamics in plastic film packaging of fruit and vegetables. *Journal of Food Engineering*, 116,(1), 144-154.

Miranda, R. A. C., T. D. Davies and S. E. Cornell, 2000. A laboratory assessment of wetness sensors for leaf, fruit and trunk surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102,(4), 263-274.

Urquiola, A., G. Alvarez and D. Flick, 2017. Frost formation modeling during the storage of frozen vegetables exposed to temperature fluctuations. *Journal of Food Engineering*, 214,(16-28).

Yilmaz, D., 2020. Computational fluid dynamics modeling of surface condensation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42,(7), 351.