Caractérisation expérimentale de l'aéraulique d'un hâloir de fromagerie et des échanges air-produit

Pierre-Sylvain MIRADE^{a*}, Tania ROUGIER^a, Alain KONDOYAN^a,
Jean-Dominique DAUDIN^a, Daniel PICQUE^b, Georges CORRIEU^b

^a Équipe Génie des Procédés, Station de Recherches sur la Viande, INRA-Theix,
63122 Saint-Genès-Champanelle, France

^b UMR Génie et Microbiologie des Procédés Alimentaires, INRA-INAPG,
78850 Thiverval-Grignon, France

(Received 13 April 2004; accepted 12 July 2004)

Abstract – Experimental characterization of airflow pattern in a cheese-ripening room and consequences on the exchanges between air and products. Controlling airflow and climatic conditions inside cheese-ripening rooms is of paramount importance because it determines both the efficiency and the homogeneity of cheese-ripening and weight losses. In this paper we studied the airflow distribution in a pilot cheese-ripening room 5.8 m long, 4.8 m wide and 2.9 m high. The geometry, the filling and operation of the ripening room were specially selected to be fully representative of what exists in industry. Inside the room, we evaluated the ventilation homogeneity and quantified its effects on the heat and water exchanges with cheese models. The ventilation system was composed of a blowing duct made of textile material running along the ceiling at half-width in the room, and a suction duct placed against a vertical wall at half-width in the room and extracting the air 35 cm from the ground. The whole airflow rate blown was $1600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. We measured the air velocity in the whole room on a regular experimental mesh. In the free space in the room, we used a fast method set up at the laboratory of INRA of Theix. A specific system was built to support and automatically move the hot film-type anemometers used for measuring the velocity with a slow and fairly constant velocity. Within the stacks, we built a telescopic antenna to move the sensors between the racks. The results show that the air blown through the holes flows along the ceiling and the wall, before being separated into two parts when it reaches the top of the side stacks: from here, the first part of the air still flows down along the wall before entering the stack, and the second part of the airflow travels back towards the blowing duct. Inside the side stacks, a marked gradient in air velocity distribution appears according to the height, with velocities ranging from about 0.05 to $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Poor ventilation is visible within the stack located in the middle of the room. Determination of heat and water transfer coefficients in a wind tunnel reveals that the values of these coefficients can triple when the air velocity is increased from 0.05 to $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ around plaster casts of cylinders 100 mm in diameter and 40 mm high. Measurements of weight loss performed on 18 plaster casts placed at different locations in the ripening room clearly highlighted the effect of velocity magnitudes on the intensity of water exchanges for cheeses with small dimensions. The weight loss can also be calculated from the standard exchange laws using the values of transfer coefficients determined in the wind tunnel.

Airflow pattern / cheese-ripening room / air velocity / heat transfer coefficient / water transfer coefficient / weight loss

* Auteur correspondant : mirade@clermont.inra.fr

Résumé – Cet article étudie l'aéraulique d'un hâloir pilote de fromagerie dont la géométrie et le fonctionnement sont tout à fait représentatifs de ce qui existe en industrie, évalue l'homogénéité de la répartition des vitesses d'air autour et dans les piles remplissant le hâloir, et quantifie l'incidence de cette répartition sur les échanges de chaleur et d'eau air/modèle de fromage et air/fromage. Les résultats montrent une hétérogénéité dans la distribution de la ventilation, avec des vitesses d'air faibles, qui varient de moins de 0,05 à environ 0,4 m·s⁻¹ dans les piles. Cette hétérogénéité modifie d'un facteur 1 à 3 les coefficients d'échanges de chaleur et d'eau, déterminés en soufflerie par psychrométrie sur des moulages en plâtre de cylindres de 100 mm de diamètre et de 40 mm de hauteur. L'influence de la vitesse de l'air sur les pertes d'eau de produits de petit format est aussi clairement mise en évidence et démontrée. Il est également démontré qu'il est possible de calculer la perte d'eau des fromages, à partir des lois classiques d'échange et des valeurs des coefficients de transfert à l'interface air/produit mesurées en soufflerie.

Aéraulique / hâloir d'affinage de fromage / vitesse d'air / coefficient d'échange de chaleur / coefficient d'échange d'eau / perte de masse

1. INTRODUCTION

L'étape d'affinage est considérée comme un révélateur de qualité, car elle correspond à la dernière étape de la fabrication de fromages. Elle succède aux étapes de standardisation du lait, de coagulation (formation d'un gel semi-solide) et d'égouttage (élimination de lactosérum et formation d'un caillé). Correspondant à une digestion enzymatique des constituants du caillé, l'affinage est régi par trois grands phénomènes biochimiques : la fermentation du lactose, l'hydrolyse de la matière grasse et la dégradation des protéines, ce qui confère à la pâte fromagère un aspect nouveau, une consistance et une composition différentes. Simultanément, arôme, texture et saveur se développent [6]. De nombreux micro-organismes, plus de 10⁹ ufc·g⁻¹, tels que des bactéries lactiques, des microcoques, des bactéries corynéformes, des bactéries propioniques, des levures et des moisissures, participent à la phase d'affinage, en agissant sur le substrat par les enzymes élaborées. Cette microflore est en constante évolution, l'équilibre microbien est instable et diverses flores se succèdent [6].

De nombreux paramètres tels que la température, le pH, l'activité de l'eau, l'hygro-

métrie, la ventilation et la composition de l'ambiance autour des fromages sont particulièrement influents et déterminants lors de la phase d'affinage, de par leur action sur le développement des micro-organismes, sur l'élaboration des enzymes et sur l'activité de ces enzymes. La température est considérée comme le facteur majeur de développement de la microflore et de l'activité enzymatique. Le pH et l'activité de l'eau de la pâte fromagère participent à la sélection microbienne et modulent l'activité enzymatique. L'hygrométrie a un double rôle puisqu'elle conditionne, en partie, la perte d'eau des fromages et l'activité de l'eau en surface. Le rôle de la ventilation est complexe et reste mal quantifié ; elle sert à évacuer la chaleur et l'humidité générées par les fromages, elle influe sur les pertes de poids et sur la composition gazeuse (CO₂, O₂, NH₃) de l'atmosphère environnant les fromages, qui elle-même a une action sur l'affinage. Par exemple, la présence d'ammoniac et d'oxygène dans l'atmosphère d'affinage facilite, respectivement, la diminution de l'acidité de surface [14] et le développement des *Penicillia* [12], dans le cas de la fabrication du camembert. Une forte teneur en CO₂ favorise une ouverture importante des pâtes pressées cuites, en stimulant la

fermentation propionique. Différents ouvrages décrivant le processus d'affinage des fromages soulignent le rôle important de la ventilation dans le bon déroulement de l'affinage, sans toutefois donner d'informations quantitatives précises [2, 6]. Les auteurs de ces livres s'accordent à recommander une ambiance homogène, avec une circulation d'air autour des fromages faible (vitesse de l'ordre de $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) et un débit d'air dans l'installation « suffisamment » grand.

La conception et la gestion des hâloirs (composition de l'atmosphère, aéraulique, chargement en fromage) reposent sur des savoir-faire anciens et sur beaucoup d'empirisme. Les problèmes d'aéraulique des hâloirs n'ont jamais été abordés, de façon à aboutir à des procédures de conduite reconnues, sûrement parce que la circulation de l'air est particulière à chaque installation. Celle-ci dépend de la géométrie du hâloir et de la nature des systèmes de distribution d'air (soufflage et reprise en direct, distribution par gaine textile). Ainsi, l'homogénéité de la distribution des conditions d'ambiance est très difficile à atteindre en tout point d'un local d'affinage. Des écarts d'humidité relative supérieurs à 10 % ont été observés en différents points d'une enceinte d'affinage d'Emmenthal, avec des répercussions sur la formation de la croûte [9]. Des vitesses variant de 0,1 à plus de $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ont été mesurées dans deux locaux frigorifiques d'entreposage de fromages ; ces différences de vitesse étaient à l'origine d'une hétérogénéité de refroidissement des produits [3]. Dans les hâloirs d'affinage, il est fréquent d'observer des écarts de vitesse, certes plus faibles que dans les locaux d'entreposage, mais néanmoins importants ; cependant, la plupart de ces travaux sont faits en interne ou sont confidentiels. La conséquence est que les professionnels sont contraints de déplacer régulièrement les fromages dans les chambres d'affinage, de façon à réduire la dispersion des pertes de poids et à homogénéiser l'aspect des produits.

Le travail présenté dans cet article s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherches visant à mettre au point une instrumentation pour contrôler l'environnement gazeux des hâloirs. Le développement d'un système associant une instrumentation performante des hâloirs et des informations sur leur aéraulique permettrait aux fromagers, à partir de leur savoir-faire actuel, de bâtir leur propre stratégie de gestion des atmosphères des hâloirs, avec des conséquences positives directes sur la régularité et la qualité des productions. Cet article se limite à présenter les résultats expérimentaux portant sur l'étude aéraulique d'un hâloir pilote de fromagerie de 81 m^3 , l'évaluation de l'homogénéité de la répartition des vitesses d'air autour de modèles de fromage de 10 cm de diamètre, et sur la quantification de l'incidence de cette répartition sur les échanges de chaleur et d'eau air/modèle de fromage et air/fromage. La géométrie du hâloir (forme parallélépipédique, soufflage en plafond au moyen d'une gaine textile et aspiration en partie basse à l'une des deux extrémités) a été choisie en concertation avec un équipementier qui construit et aménage des hâloirs, afin d'être tout à fait représentative de configurations industrielles existantes.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Description du hâloir pilote de fromagerie

Le hâloir pilote construit a un volume de 81 m^3 , soit une longueur Y de 5,8 m, une largeur X de 4,8 m et une hauteur Z de 2,9 m. Le chargement en produits de ce hâloir a été réalisé au moyen de 6 rangées de 7 piles de 16 claies en inox (Figs. 1a et 1b) ; dans la configuration testée, le nombre de rangées de piles était, en réalité, de 3, du fait qu'elles étaient collées deux par deux dans le sens de la longueur Y (Fig. 1b). Ces claies, d'une largeur de 51 cm et d'une longueur de 63 cm, s'emboîtaient les unes dans les autres, en laissant un espace libre de 10 cm

Figure 1. Description de la géométrie du hâloir de fromagerie pilote étudiée dans ce travail, selon (a) une vue intérieure et (b) une vue de dessus.

Figure 1. Description of the geometry of the pilot cheese-ripening room studied in this work according to (a) an inside view and (b) a top view.

en hauteur ; elles supportaient chacune 21 leurres de fromages, soit un total de 14112 leurres, représentés dans l'étude par des boîtes de conserve de 10 cm de diamètre et de 4,4 cm de haut (Fig. 1a). Le but principal de ce travail étant d'étudier l'écoulement de l'air dans le hâloir, les fromages ont été remplacés par des éléments inertes de dimension équivalente, qui offraient la même résistance à la circulation de l'air.

Un système de conditionnement d'air était placé dans un faux plafond situé au-dessus du volume du hâloir pilote (Fig. 2). Deux ventilateurs disposés en parallèle, d'un débit maximal de $10000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ chacun, insufflaient l'air dans une gaine de soufflage métallique de section rectangulaire de $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, de longueur 5,6 m et percée de 11 trous de 315 mm de diamètre. Seul un de ces trous était utilisé pour la connexion au hâloir pilote. Sur cette connexion, était disposé un clapet de dosage à iris, de diamètre interne variable de 315 à 150 mm, utilisé pour réguler le débit de soufflage dans le

hâloir (Fig. 2). Des prises de pression situées entre l'amont et l'aval de l'iris permettaient la mesure du débit. Des batteries chaude et froide, placées entre les ventilateurs et la gaine métallique, assuraient une régulation de la température de l'air.

Le système de ventilation installé à l'intérieur du hâloir a été conçu et disposé de façon à reproduire une situation industrielle courante, à savoir, un conditionneur d'air placé en bout de hâloir, aspirant l'air en partie basse et rejetant l'air traité en partie haute. Ce système de ventilation était composé d'une gaine de soufflage textile (qui est le système de diffusion de l'air le plus installé, actuellement, en fromagerie) et d'une gaine d'aspiration, ayant respectivement un diamètre de 340 mm et de 315 mm (Figs. 1a et 1b). La gaine de soufflage, disposée au niveau du plafond, au milieu du hâloir, dans le sens de la longueur Y, était dotée de chaque côté de 3 rangées de trous de 6 mm de diamètre ; les trous étaient disposés sur toute la longueur de la gaine et placés

Figure 2. Description schématique selon une coupe longitudinale de l'installation expérimentale dans laquelle le hâloir pilote a été construit.

Figure 2. Schematic description on a longitudinal view of the experimental plant, where the pilot ripening room was built.

sur des génératrices hautes du cylindre, à proximité du plafond. La gaine d'aspiration était disposée contre un mur vertical, dans le même plan que la gaine de soufflage, et était raccordée au faux-plafond de l'enceinte qui faisait office de volume d'aspiration (Fig. 2). L'air était aspiré sur l'ensemble de la section de la gaine, à une hauteur Z de 35 cm par rapport au sol. Le débit d'air introduit dans le hâloir pilote était de $1600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, soit un taux de renouvellement de l'air d'environ $20 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$, ce qui correspond à la pratique industrielle pour ce type de hâloir.

2.2. Mesure de la vitesse de l'air

Les écoulements d'air dans les appareils agro-alimentaires tels que les hâloirs d'affinage sont instables et turbulents, ce qui tend à complexifier les mesures de vitesse moyenne [11]. Plusieurs tests menés sur sites industriels ont révélé que la stabilité de la moyenne calculée pour la vitesse en un

point (i.e. la vitesse d'air moyenne) n'était atteinte qu'après une accumulation de mesures instantanées sur plusieurs dizaines de secondes, voire plusieurs minutes (méthode classique de la moyenne). Cela nous a conduits à utiliser une méthode rapide de mesure de la vitesse de l'air [7], mise au point pour des études précédentes et bien adaptée à la configuration étudiée ici. Le principe de cette méthode est le suivant : à l'enregistrement à intervalle de temps régulier de la vitesse de l'air par des anémomètres à boule chaude déplacés lentement et continûment, des techniques de traitement du signal (transformée de Fourier et filtrage passe-bas) sont appliquées pour éliminer l'instabilité de l'écoulement et ne conserver que les variations spatiales de la vitesse moyenne. La distribution de cette vitesse moyenne est ensuite visualisée en niveau d'intensité sur des graphiques, dont l'examen permet d'analyser en 3 dimensions le fonctionnement aéraulique de l'appareil [7].

Du fait de sa rapidité, cette méthode continue a été utilisée pour mesurer la vitesse de l'air au-dessus des piles et dans les couloirs entre les piles. Les sondes de mesure de vitesse d'air (boules chaudes modèle 8465, TSI, MN, USA) ont été déplacées à l'intérieur de l'enceinte, en X et en Y, par un système motorisé (Fig. 1a) commandé par ordinateur. Une nacelle permettant de supporter les batteries d'alimentation des capteurs et la centrale d'enregistrement des données (modèle DT600, DataTaker Pty Ltd, Rowville, Victoria, Australie), d'une capacité de 350000 valeurs, a été installée sur ce système à déplacement (Fig. 1a). La nacelle supportait également une barre verticale à laquelle les boules chaudes utilisées étaient accrochées à différentes hauteurs. Le déplacement des capteurs le long de cette barre (déplacement en Z) était manuel. Une mesure instantanée par seconde a été enregistrée durant le déplacement des capteurs, effectué dans le sens de la longueur Y du hâloir, à une vitesse de $1,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Au final, la résolution spatiale au-dessus et entre les piles était donc de 1,5 cm.

Au sein des piles, la méthode rapide était inadaptée ; seule la méthode classique de la moyenne était utilisable. Afin d'introduire les anémomètres à l'intérieur des piles, une antenne télescopique commandée par un moteur géré par ordinateur a été conçue. La boule chaude (modèle 8475, TSI, MN, USA) utilisée était fixée sur un support en téflon à l'extrémité de cette antenne. Des tests préliminaires ont montré que, pour des acquisitions effectuées toutes les 5 s, 40 s d'enregistrement suffisaient pour obtenir une moyenne des vitesses stable.

De manière à obtenir, au final, un maillage régulier unique pour l'ensemble de l'espace, dans et hors des piles de claies, les points de mesure ont été répartis uniformément dans chacune des 3 directions de l'espace. Un total de 8400 points de mesure de vitesse d'air a été réalisé dans tout le volume du hâloir, soit un point tous les 19 cm selon la largeur X, tous les 21 cm selon la longueur Y, et tous les 20 cm selon la hauteur Z.

2.3. Mesure des échanges de chaleur et d'eau

2.3.1. Détermination des coefficients de transfert en soufflerie

L'étude des échanges de chaleur et d'eau entre l'air et les modèles de fromage passe par la détermination de coefficients de transfert de chaleur et d'eau, qui permettent de relier directement les flux aux grandeurs physiques mesurables que sont la température et l'activité de l'eau de surface de l'objet et les températures sèches et de rosée de l'air. Les valeurs de ces coefficients sont donc liées à l'objet (forme, dimension) mais aussi, à l'écoulement (vitesse, turbulence du fluide). Bien que pouvant être déterminés théoriquement, l'expérimentation reste le meilleur moyen de les quantifier dans le cas d'objets de forme quelconque [5].

Plusieurs méthodes expérimentales permettent de déterminer la valeur de ces coefficients. Parmi ces méthodes, la méthode psychrométrique autorise une détermination simultanée des coefficients de transfert de chaleur et d'eau en ayant pour principe, l'évaporation d'eau à la surface d'un objet en régime stationnaire. Dans l'optique de mesurer simultanément les coefficients de transfert moyens ou locaux sur des objets de forme complexe placés dans des flux d'air en condition maîtrisée, l'INRA de Theix a repris et adapté le principe de cette méthode [5].

Dans ce travail, la mesure des coefficients de transfert [13] s'est déroulée sur un objet en plâtre de 10 cm de diamètre et 4 cm d'épaisseur, reproduisant un fromage. Cet objet saturé en eau (l'activité de l'eau a_w à la surface de l'objet était donc égale à 1) a été placé dans une soufflerie capable de générer un écoulement d'air régulé en température, stabilisé pour des vitesses supérieures à $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et de taux de turbulence égal à 12%, soit le taux de turbulence moyen mesuré dans les installations industrielles de l'agroalimentaire [1]. L'hygrométrie de l'air de cette soufflerie était contrôlée par un hygromètre à miroir (modèle Dew10, General

Earstern, Wilmington, USA) et maintenue constante par un système asséchant constitué de plusieurs récipients remplis, au total, de 5 kg de gel de silice, autour desquels circulait l'air prélevé dans la veine de la soufflerie.

Afin de mesurer la température moyenne à la surface du solide, 3 thermocouples de type K, préalablement étalonnés dans un bain thermostaté, à différentes températures, par comparaison à une valeur de référence donnée par une sonde platine de précision, ont été intégrés en 3 points de la surface du solide lors de son moulage. La localisation en surface de ces thermocouples a été préalablement étudiée pour que la température moyenne résultante corresponde à celle qui aurait été obtenue avec une multitude de thermocouples placés en surface [4]. Un quatrième thermocouple de type K a été placé à environ 5 mm de la surface latérale de l'objet en plâtre, afin de mesurer la température de l'air environnant. Lors des expérimentations, la température sèche de l'air a été fixée à 20 °C, de façon à minimiser les phénomènes de convection libre pouvant survenir aux très basses vitesses d'air. Avant chaque expérience, l'objet était hydraté environ 14 h, dans un bain d'eau à température proche de la température humide. L'objet était positionné dans la cellule de mesure de la soufflerie, en vissant la tige filetée intégrée lors du moulage sur une plaque reposant sur une balance précise au 1/10^e de gramme (Modèle PM34K, Mettler Toledo, Colombus, USA). Les mesures de masse, ainsi que les températures à la surface et autour de l'objet, étaient enregistrées chaque minute, en même temps que les températures sèches et de rosée de l'air de la soufflerie, sur une période de 4 h durant la phase d'équilibre du séchage. Ces données étaient ensuite intégrées à un programme informatique, calculant les valeurs expérimentales des coefficients de transferts de chaleur et d'eau, à partir des deux relations suivantes issues de l'écriture du bilan d'échange d'énergie à la surface de l'objet durant la phase d'équilibre du séchage (par hypothèse, dans le terme de

radiation, la température de paroi de la soufflerie a été considérée comme étant égale à celle de l'air) :

$$\bar{h} = \frac{-\bar{\Phi}_m L_{\text{vap}}}{T_{\text{air}} - \bar{T}_s} - \frac{\varepsilon \sigma (T_{\text{air}}^4 - \bar{T}_s^4)}{T_{\text{air}} - \bar{T}_s} \quad (1)$$

où

- h est le coefficient de transfert de chaleur convectif ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) ;
- $\bar{\Phi}_m$ est le flux de matière calculé à partir de la mesure de perte de masse de l'objet ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) ;
- L_{vap} est la chaleur latente de vaporisation de l'eau ($\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1}$) ;
- ε est l'émissivité du corps, égale à 0,91 pour le plâtre (sans dimension) ;
- σ est la constante de Stefan-Boltzmann égale à $5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$;
- T_{air} est la température de l'air autour de l'objet (K) ;
- T_s est la température de surface de l'objet mesurée au moyen des trois thermocouples disposés juste sous la surface de l'objet (K).

$$\bar{k} = \frac{\bar{\Phi}_m}{(P_{\text{vap}}(T_{\text{rosée}}) - a_{\text{ws}} P_{\text{vap}}(\bar{T}_s))} \quad (2)$$

où

- k est le coefficient de transfert d'eau ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) ;
- a_{ws} est l'activité de l'eau en surface du moulage, qui est égale à 1, du fait de la saturation totale en eau (sans dimension) ;
- P_{vap} est la pression de vapeur saturante à la température considérée (Pa) ;
- $T_{\text{rosée}}$ est la température de rosée (K).

Dans les deux équations, le trait au-dessus des variables symbolise la valeur moyenne de la variable considérée.

2.3.2. Mesures de pertes de masse dans le hâloir pilote

Afin de vérifier la validité des mesures des coefficients d'échange réalisées dans

la soufflerie et l'influence réelle du module de la vitesse sur les pertes d'eau, 18 moulages en plâtre de 10 cm de diamètre et de 4 cm de hauteur ont été réalisés, afin d'être placés à différents endroits dans les piles remplissant le hâloir pilote. Le protocole expérimental consistait à disposer ces 18 moulages saturés en eau en lieu et place de 18 boîtes de conserve. Le choix de leur emplacement a été fait uniquement en fonction de la valeur du module de vitesse mesurée lors de l'étude aéraulique, de façon à balayer au mieux la plage de vitesse comprise entre $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La masse de chaque moulage a été mesurée toutes les 60 min sur une période de 6 h, au moyen d'une balance précise au $1/10^{\text{e}}$ de gramme (modèle PM34K, Mettler Toledo, Colombus, USA).

Les valeurs de pertes de masse mesurées ont ensuite été comparées à des valeurs calculées à partir de la relation (3) qui utilise les coefficients de transfert de chaleur (h) et d'eau (k) déterminés dans la soufflerie :

$$Pdm_{\text{th}} = k \cdot S \cdot (a_{\text{ws}} P_{\text{vap}}(\text{Teq}) - P_{\text{vap}}(\text{Trosée})) \cdot 3600 \cdot 1000 \cdot 24 \quad (3)$$

où

– Pdm_{th} est la perte de masse calculée du moulage en plâtre (en $\text{g}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) ;

– k est la valeur du coefficient de transfert de masse mesurée dans la soufflerie par psychrométrie et donnée par la figure 7, en fonction de la vitesse d'air moyenne régnant autour du moulage en plâtre (en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ;

– S est la surface d'échange entre le moulage et l'air, égale à la surface développée totale du moulage (en m^2) ;

– T_{eq} est la température de surface du moulage, qui résulte d'un équilibre entre les phénomènes de transferts thermiques par convection, rayonnement et évaporation. Sa valeur est déterminée numériquement à partir de la résolution du bilan d'énergie thermique, qui s'écrit en surface du moulage de la manière suivante (en K) :

$$h \cdot (T_{\text{eq}} - T_{\text{air}}) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{\text{eq}}^4 - T_{\text{air}}^4) + k \cdot L_{\text{vap}} \cdot (a_{\text{ws}} \cdot P_{\text{vap}}(\text{Teq}) - P_{\text{vap}}(\text{Trosée})) = 0 \quad (4)$$

– $T_{\text{rosée}}$ est la température de rosée de l'air mesurée dans le hâloir pilote au moyen d'un hygromètre à miroir (Optidew, Michell Instruments Ltd, Cambridge, UK). Mesurée en un seul point, elle a été supposée constante dans tout le volume du hâloir, compte tenu du nombre peu élevé de moulages introduits et échangeant de l'eau avec l'air (en K).

La résolution des équations (3) et (4) a fait l'objet de l'écriture de programmes de calcul élaborés avec le langage de programmation Matlab (The MathWorks, Natick, USA).

3. RÉSULTATS

3.1. Vitesses d'air dans le hâloir

L'étude de la répartition des vitesses d'air au sein du hâloir peut être abordée selon deux points de vue distincts : la répartition générale des flux d'une part, révélant les mouvements globaux de l'air autour des piles de fromages, et d'autre part, la répartition des vitesses d'air au sein des piles, c'est-à-dire autour des fromages. La répartition des vitesses d'air mesurées est représentée par des cartographies en niveaux d'intensité, allant du blanc (vitesses inférieures à $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) au noir (vitesses supérieures à $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), où chaque intersection de lignes correspond à un point de mesure. Afin de faciliter la vision des écoulements à l'intérieur des piles où les vitesses d'air sont faibles (Figs. 3 à 5), toutes les vitesses supérieures à $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sont représentées en noir, y compris les valeurs dépassant $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ situées de chaque côté de la gaine de soufflage.

La coupe verticale décrivant la répartition de la norme des vitesses d'air mesurées autour des piles au milieu du hâloir, est présentée sur la figure 3. Les trois rectangles du bas de cette figure schématisent les piles de fromages, et le cercle du haut, la gaine de soufflage, dans lesquels les vitesses d'air ne sont pas représentées. En observant

Figure 3. Distribution des vitesses d'air mesurées autour des piles, selon une coupe verticale située à mi-longueur dans le hâloir pilote (sur cette figure, les rectangles blancs matérialisent les piles de fromages, le cercle représente la gaine de soufflage, les coordonnées sont données par rapport à l'emplacement des parois, une vue de dessus indique la position du plan de coupe et chaque intersection de ligne correspond à un point de mesure).

Figure 3. Distribution of the air velocities measured around the stacks on a vertical section located at half-length in the pilot ripening room (in the figure, the white rectangles represent the stacks of cheeses, the circle indicates the location of the blowing duct, the coordinates are given from the location of the walls, a top view shows the location of the section and each line intersection corresponds to a measurement point).

la figure 3, il apparaît que le flux d'air, expulsé latéralement de la gaine de soufflage à une vitesse supérieure à $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, circule le long du plafond du hâloir, avant de se réfléchir contre les parois latérales. Le flux d'air réfléchi se divise ensuite en deux parties distinctes, au contact de l'angle supérieur des piles latérales : la première partie suit les parois en conservant une vitesse relativement élevée (entre $0,4$ et $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), tandis que la seconde entraîne la formation d'une recirculation au-dessus des piles latérales, en revenant vers la gaine de soufflage. Ce phénomène crée une zone très peu ventilée, où les vitesses d'air sont inférieures à $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ au-dessus de la pile centrale, sous la gaine de soufflage. D'autre part, les vitesses d'air dans les couloirs entre les piles restent

inférieures à $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, avec une légère accélération à l'approche du sol, liée à la position de la gaine d'aspiration. Enfin, l'écoulement pouvant être considéré comme symétrique par rapport à un plan passant par la gaine de soufflage (Fig. 3), les vues suivantes ne rendent compte des vitesses d'air mesurées à l'intérieur des piles que sur la moitié de la largeur du hâloir.

Les mesures de la norme des vitesses d'air au sein des piles de fromages sont présentées sur la figure 4. Au niveau des piles latérales, le flux d'air qui suit la paroi finit par pénétrer la pile à partir de sa moitié inférieure, créant un gradient de vitesse très fort entre le haut et le bas des piles, avec des vitesses d'air variant de moins de $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Par ailleurs, la claie la plus

Figure 4. Distribution des vitesses d'air mesurées autour et dans les piles, selon une coupe verticale située à mi-longueur dans le hâloir pilote (sur cette figure, les rectangles matérialisent le pourtour des piles, le cercle représente la gaine de soufflage, les coordonnées sont données par rapport à l'emplacement des parois, une vue de dessus indique la position du plan de coupe et chaque intersection de ligne correspond à un point de mesure ; du fait d'une symétrie, seule la moitié de la vue est représentée).

Figure 4. Distribution of the air velocities measured around and into the stacks, on a vertical section located at half-length in the pilot ripening room (in the figure, the rectangles represent the outline of the stacks, the circle indicates the location of the blowing duct, the coordinates are given from the location of the walls, a top view shows the location of the section and each line intersection corresponds to a measurement point; owing to symmetry, only the half-width of the room is shown).

haute de ces piles subit des vitesses élevées, du fait des recirculations qui se créent au-dessus. Enfin, la quasi-totalité de la pile centrale est ventilée avec des vitesses d'air inférieures à $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Les mesures révèlent même que la moitié de ces vitesses est inférieure à $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, soit à la limite basse de fonctionnement de l'anémomètre à boule chaude utilisé (modèle 8475, TSI, MN, USA).

Les mesures indiquent que le schéma général d'écoulement de l'air révélé par la

figure 4 au milieu du hâloir se répète sur toute la longueur de l'appareil, à savoir, une très faible ventilation de la pile centrale et un fort gradient vertical de vitesses pour les piles latérales, avec toutefois, une très légère variation sur le plan des modules due à un effet tridimensionnel induit par la présence en bout de hâloir du point d'aspiration (Figs. 5a et 5b).

Ces résultats montrent une très grande hétérogénéité de l'écoulement de l'air dans cette configuration de hâloir. Il était donc

Figure 5. Distribution des vitesses d'air mesurées autour et dans les piles, selon deux coupes verticales situées (a) à une distance de 160 cm de la gaine d'aspiration (Fig. 1b) et (b) à une distance de 410 cm de cette même gaine (sur ces figures, les rectangles matérialisent le pourtour des piles, le cercle représente la gaine de soufflage, les coordonnées sont données par rapport à l'emplacement des parois, une vue de dessus indique la position du plan de coupe et chaque intersection de ligne correspond à un point de mesure ; du fait d'une symétrie, seule la moitié de la vue est représentée).

Figure 5. Distribution of the air velocities measured around and into the stacks of cheeses, on two vertical sections located (a) at 160 cm from the suction area of the air (Fig. 1b) and (b) at 410 cm from this same suction area (in the figures, the rectangles represent the outline of the stacks, the circle indicates the location of the blowing duct, the coordinates are given from the location of the walls, a top view shows the location of the section and each line intersection corresponds to a measurement point; owing to symmetry, only the half-width of the room is shown).

important d'évaluer l'incidence de cette hétérogénéité sur les échanges de chaleur et d'eau s'établissant entre les fromages et l'air.

3.2. Conséquences sur les échanges air-produit

3.2.1. Coefficient de transfert de chaleur et d'eau

Les figures 6 et 7 donnent, respectivement, l'évolution, en fonction de la vitesse de l'air, du coefficient de transfert de chaleur convectif (Fig. 6) et du coefficient de transfert d'eau (Fig. 7) mesurés par psychrométrie dans la soufflerie sur un moulage en plâtre de fromage. La plage de vitesse correspond aux valeurs mesurées dans le hâloir pilote au cœur des piles.

Compte tenu de la faible valeur des vitesses d'air, les deux courbes ont été approchées par une fonction exponentielle, qui est la forme de courbe la mieux adaptée pour des transferts en convection mixte. Les lois en puissance généralement admises en transferts convectifs ne restant valables qu'en convection forcée [8]. La forme exponentielle présente aussi l'avantage de donner des valeurs numériques qui ont un sens physique, quand la valeur de la vitesse tend vers 0, c'est-à-dire lorsque les transferts ne se font plus qu'en convection libre. Les figures 6 et 7 indiquent des variations d'environ 1 à 3 de la valeur des coefficients d'échange de chaleur et d'eau, suivant que la vitesse de l'air autour du moulage est inférieure à $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (cas où il serait placé au cœur de la pile centrale) ou proche de $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (cas où il serait placé en bas ou sur la claie la plus haute des piles latérales).

3.2.2. Pertes d'eau dans le hâloir expérimental

Les résultats présentés sur la figure 8 confirment que la vitesse a un effet marqué sur l'intensité des échanges d'eau entre l'air et les produits. Cette figure montre que la perte de poids est double si la vitesse de l'air autour du moulage passe de $0,07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à

$0,40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ceci est une traduction directe de l'augmentation correspondante du coefficient de transfert d'eau (Fig. 7).

La figure 9 qui compare les pertes de poids mesurées sur les moulages aux pertes de poids calculées à partir des lois d'échanges (Éqs. (3) et (4)) et des valeurs des coefficients d'échange déterminées expérimentalement en soufflerie (Fig. 7), indique un coefficient de corrélation de 0,84 avec la droite d'équation ($y = x$). Cette bonne adéquation sur les 18 moulages entre pertes de poids calculées et mesurées prouve la validité des valeurs des coefficients d'échange déterminées en soufflerie par psychrométrie. Leur utilisation ultérieure en simulation de procédé (calcul de pertes d'eau sur des fromages ayant les mêmes dimensions que les moulages en plâtre) est donc possible.

4. DISCUSSION

4.1. Incertitudes

Plusieurs facteurs influencent les pertes de poids et peuvent occasionner des erreurs sur les valeurs reportées sur les figures 8 et 9. Il est indéniable aussi que la disposition des points sur ces figures n'est pas optimale par rapport à l'axe des abscisses : en effet, compte tenu des faibles valeurs de vitesse mesurées dans les piles remplissant le hâloir, la moitié des points reportés sur les figures 8 et 9 correspond à une vitesse d'air de l'ordre de $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Néanmoins, cela permet d'obtenir une tendance et de montrer avec clarté l'effet vitesse d'air.

Parmi les incertitudes de mesure susceptibles de générer des erreurs sur les pertes de poids mesurée et calculée à partir des lois d'échanges, citons :

- L'incertitude sur la mesure de la perte de poids liée à l'utilisation d'une balance et à un éventuel égouttage des moulages en plâtre en début d'expérimentation. Cette erreur, a priori faible, a été estimée à 5 %. Elle correspond aux barres d'erreur introduites sur l'axe des ordonnées de la figure 8 et sur l'axe des abscisses de la figure 9.

Figure 6. Influence de la vitesse de l'air sur la valeur des coefficients de transfert de chaleur mesurée en soufflerie à la surface d'un moulage en plâtre d'un cylindre de 100 mm de diamètre et de 40 mm de hauteur.

Figure 6. Influence of the air velocity on the value of heat transfer coefficients measured in a wind tunnel at the surface of a plaster cast of a cylinder 100 mm in diameter and 40 mm high.

Figure 7. Influence de la vitesse de l'air sur la valeur des coefficients de transfert d'eau mesurée en soufflerie à la surface d'un moulage en plâtre d'un cylindre de 100 mm de diamètre et de 40 mm de hauteur.

Figure 7. Influence of the air velocity on the value of water transfer coefficients measured in a wind tunnel at the surface of a plaster cast of a cylinder 100 mm in diameter and 40 mm high.

Figure 8. Influence de la vitesse de l'air sur la perte de poids de moulages en plâtre de cylindres de 100 mm de diamètre et de 40 mm de hauteur, totalement imbibés d'eau et placés à différents endroits dans les piles remplissant le hâloir pilote.

Figure 8. Influence of the air velocity on the weight loss of plaster casts of cylinders 100 mm in diameter and 40 mm high, fully saturated with water and put at different locations into the stacks filling the pilot ripening room.

Figure 9. Comparaison entre les pertes de poids mesurées sur des moulages en plâtre de cylindres de 100 mm de diamètre et de 40 mm de hauteur (Fig. 8) et celles calculées à partir de l'équation (3) (le calcul utilise les coefficients de transferts de chaleur et d'eau présentés sur les figures 6 et 7).

Figure 9. Comparison between the weight losses measured on plaster casts of cylinders 100 mm in diameter and 40 mm high (Fig. 8) and those calculated from equation (3) (the calculation uses the heat and water transfer coefficients presented in Figures 6 and 7).

– L'incertitude sur la valeur de la vitesse d'air moyenne à prendre en compte dans le calcul de la perte de poids des moulages. En effet, la vitesse d'air moyenne prise en compte dans ce calcul correspond à la vitesse d'air mesurée en un point à l'endroit où les moulages ont été placés. Or, il est fort possible que la valeur mesurée en un point ne soit pas totalement représentative de la valeur moyenne autour du moulage, qui elle, est à l'origine de la perte de poids mesurée. Sur ce plan, la réalisation de mesures complémentaires a révélé que des écarts pouvant atteindre 20 % existaient entre la valeur de la vitesse d'air mesurée en un point et la vitesse moyenne calculée à partir de 20 points de mesure répartis autour du moulage. L'erreur de mesure reportée sur l'axe des abscisses de la figure 8 correspond à cette erreur.

– L'erreur de 20 % sur la détermination de la vitesse moyenne autour d'un moulage entraîne une incertitude sur le calcul de la perte de poids, en modifiant les valeurs de la température d'équilibre et des coefficients d'échange. L'incertitude sur le calcul de la perte de poids est d'autant plus forte que la vitesse de l'air est elle-même élevée. Pour une vitesse d'air moyenne de $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, l'erreur de 20 % sur la vitesse provoque une incertitude de $\pm 20 \%$ sur la perte de poids du moulage cumulée sur 24 h. Cette incertitude devient inférieure à 5 %, quand la vitesse d'air est égale à $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ces incertitudes ont été calculées à partir de la relation (3).

– L'incertitude sur la valeur des coefficients d'échange, lorsque la vitesse de l'air tend vers zéro, domaine où la convection naturelle devient prépondérante. Dans ce cas, la figure 6 indique une valeur du coefficient d'échange de chaleur tendant vers $3,95 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Les corrélations de la littérature [8] indiquent une valeur de $3,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pour une différence de température air/objet identique à celle qui existait dans la soufflerie. Rappelons que la température de surface de l'objet était inférieure de plusieurs degrés à celle de l'air (20°C), puisque le moulage en plâtre avait

été au préalable trempé dans de l'eau dont la température était proche de la température humide. Or, en fromagerie, vu que l'humidité relative de l'air est élevée et la vitesse très faible, la différence de température entre la surface du produit et l'air n'excède pas 1 ou 2°C . Dans ces conditions, les corrélations de la littérature [8] montrent que le coefficient d'échange de chaleur est approximativement divisé par deux ; il n'est plus égal qu'à $1,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Cette incertitude sur les coefficients d'échanges pour les très faibles vitesses de l'air entraîne une variation potentielle de 25 % de la perte de poids calculée du moulage.

– Une incertitude due à une variation de 3 à 4 degrés de la température de rosée de l'air sur la durée des expérimentations dans le hâloir pilote. Cette variation était provoquée par un changement des conditions climatiques extérieures et était ressentie à l'intérieur du hâloir, puisque aucun système de contrôle de l'hygrométrie de l'air n'était installé au moment des expérimentations. Le calcul montre qu'une variation de 3°C de la température de rosée peut engendrer une variation de 8 à 10 % sur la perte de poids calculée, quelle que soit la vitesse de l'air. Compte tenu des erreurs possibles sur le calcul de la perte de poids dues à l'incertitude de 20 % sur la détermination de la vitesse moyenne, l'incertitude sur la valeur des coefficients d'échange pour les très faibles vitesses d'air et à la variation de quelques degrés de la température de rosée lors des expérimentations dans le hâloir pilote, une erreur moyenne de 25 % a été retenue pour la perte de poids calculée et a été reportée sur l'axe des ordonnées de la figure 9.

La prise en compte des barres d'erreur sur les axes de coordonnées des figures 8 et 9 confirme la validité, pour l'ensemble du domaine de mesure, de la corrélation entre la perte de poids des moulages en plâtre et la vitesse de l'air, ainsi qu'entre les pertes de poids mesurées et calculées. Cela dénote une bonne quantification des coefficients

d'échange par la méthode psychrométrique et une bonne prédiction des pertes d'eau par le programme écrit avec le langage de programmation Matlab (The MathWorks, Natick, USA).

4.2. Application au calcul de pertes de poids de fromages

La validité vérifiée des coefficients de transfert déduits des mesures psychrométriques en soufflerie autorise leur utilisation pour calculer, à partir des relations (3) et (4), les pertes d'eau dans le cas de fromages ayant les mêmes dimensions que les moulages en plâtre. Les valeurs des coefficients d'échanges de chaleur et de matière restent valables puisqu'elles ne dépendent pas de la composition de l'objet, mais uniquement de sa forme et de ses dimensions, ainsi que des caractéristiques de l'écoulement de l'air (vitesse et turbulence). La seule différence entre l'objet en plâtre et le fromage réside dans la valeur de l'activité de l'eau à la surface (a_{ws}) qui diminue au cours de l'affinage. Cette diminution de la valeur de l' a_{ws} entraîne aussi une modification de la valeur de la température de surface du fromage par rapport à celle du moulage en plâtre (Éq. (4)). Ces remarques étant faites, les relations (3) et (4) peuvent être utilisées pour calculer la perte d'eau de fromages. La figure 10 présente l'évolution de ces pertes en eau pour des fromages de type pâte molle, d'un poids initial d'environ 400 g, d'activité d'eau en surface égale à 1 (début d'affinage) ou 0,95 (en cours d'affinage), placés dans des écoulements d'air, de vitesse comprise entre 0 et $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, d'humidité relative variant de 90 à 98 %, et de température égale à 14°C . Les valeurs des coefficients de transferts en convection libre (vitesse d'air nulle) sont celles issues des corrélations de la littérature [8].

L'analyse de la figure 10 permet de se rendre compte que :

- Les pertes d'eau ne sont pas nulles, même si la vitesse d'air est nulle.

- Tout autre paramètre étant égal par ailleurs, la perte d'eau du fromage peut varier d'un facteur 5 à 6, suivant qu'il est placé dans un endroit de pile très ventilée (vitesse de $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) ou non ventilée.

- L'humidité de l'air est aussi un paramètre très important : à vitesse égale et à a_w égale à 1, une baisse de l'hygrométrie de 98 à 95 % augmente la perte d'eau d'un facteur égal à 2,5. Une baisse de 8 % de l'hygrométrie accroît autant la perte d'eau qu'une augmentation de 0 à $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ de la vitesse de l'air.

- L'abaissement de l' a_w de surface, qui se manifeste au fur et à mesure que la phase d'affinage se déroule, ralentit l'évaporation d'eau : pour une humidité relative de 90 %, une diminution de l' a_w de 1 à 0,95 divise par 2 le flux d'eau qui s'évapore de la surface du fromage.

5. CONCLUSION

Ce travail révèle une grande hétérogénéité dans la distribution de la ventilation au coeur des piles remplissant la géométrie de hâloir étudiée dans ce travail. Selon leur emplacement dans le hâloir, les fromages peuvent être soumis à des vitesses d'air inférieures à $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ou proches de $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La conséquence de cette distribution hétérogène de la ventilation, mise en évidence sur des moulages en plâtre, est une hétérogénéité des transferts de chaleur et surtout, d'eau. Il a été montré que les pertes en eau pouvaient varier d'un facteur 5 à 6 dans le cas de fromages à pâte molle de 10 cm de diamètre, uniquement à cause des différences de vitesse d'air. L'influence de l'hétérogénéité de ventilation ne doit pas non plus être anodine sur le développement des flores d'affinage à la surface des fromages, mais celle-ci reste à évaluer.

Une bonne prédiction des pertes de poids des fromages serait une aide précieuse pour les professionnels. Dans ce but, les travaux présentés ici sont en cours d'association avec des travaux visant à étudier l'interaction entre les flores d'affinage et le microclimat

Figure 10. Influence des paramètres de l'air du hâloir (vitesse et humidité) et de l'activité de l'eau de surface sur la perte de poids calculée sur des fromages de 100 mm de diamètre, pesant environ 400 g.

Figure 10. Influence of the air parameters of the ripening room (velocity and relative humidity) and of the water activity at the surface on the weight loss calculated on cheeses 100 mm in diameter weighing about 400 g.

régnant autour du fromage, de façon à quantifier la perte en carbone. En effet, des travaux récents, non encore publiés, montrent que, pour certaines conditions d'affinage, la perte de masse du fromage due à la production de CO₂ est équivalente à la perte par évaporation d'eau.

Enfin, les données aérauliques de ce travail qui mettent clairement en évidence la nécessité d'avoir une distribution d'air optimale et homogène autour des fromages, constituent une base de données pour valider les résultats de simulations numériques obtenus avec l'outil Mécanique des Fluides Numérique [10]. Une fois validé, cet outil pourra être utilisé pour améliorer l'homogénéité des conditions d'ambiance dans la géométrie de hâloir choisie dans ce travail et étudier la distribution des différents gaz influençant l'affinage (vapeur d'eau, CO₂, O₂, NH₃). À terme, uniquement au moyen

de simulations numériques, il sera possible d'optimiser le fonctionnement des hâloirs existants ainsi que la conception des nouveaux hâloirs, en gérant efficacement la composition de l'atmosphère et l'aéraulique au sein de ces locaux.

Remerciements: Les auteurs tiennent à remercier le Ministère de la Recherche, ainsi qu'ARILAIT Recherches pour le soutien financier qu'ils ont apporté au projet Aliment-Qualité-Sécurité, dans lequel s'inscrit le travail présenté ici. Ce projet associe deux équipes INRA de Grignon et de Theix, les sociétés Safrair, Fromagerie de l'Ermitage et Ysebaert, ainsi que le comité Capteurs d'ARILAIT Recherches. Nos remerciements s'adressent aussi à la région Auvergne et à l'INRA pour leur contribution financière à la construction de l'enceinte climatique de l'INRA de Theix, dans laquelle le hâloir pilote utilisé dans ce travail a été construit. Les auteurs tiennent, enfin, à remercier L. Lasteyras, J.-M. Auberger, S. Portanguen et A. Lasteyras, pour

leur appui technique et l'effort énorme qu'ils ont fourni lors de la construction du dispositif expérimental utilisé dans ce travail, ainsi qu'A. Carles pour son implication dans la mesure des pertes de poids des modèles de fromage.

RÉFÉRENCES

- [1] Daudin J.D., Kondjoyan A., Influence de l'indice de turbulence de l'écoulement sur les procédés de traitement thermique de solides par l'air, *Récents Progrès en Génie des Procédés* 5 (1991) 287–293.
- [2] Eck A. (Éd.), *Le fromage*, 2^e edn., Tec&Doc Lavoisier, Paris, France, 1990.
- [3] Falconer R.M., Cooling air distribution in a cheese store, Publication de l'Institut International du Froid - International Institute of Refrigeration 3 (1993) 406–413.
- [4] Ghisalberti L., Kondjoyan A., A thermographic method to map the local transfer coefficient on the complete surface of a circular cylinder in an air flow, *Int. J. Therm. Sci.* 40 (2001) 738–752.
- [5] Kondjoyan A., Daudin J.D., Determination of transfer coefficients by psychrometry, *Int. J. Heat Mass Transfer* 36 (1993) 1807–1818.
- [6] Mahaut M., Jeantet R., Brulé G., *Initiation à la technologie fromagère*, Tec&Doc Lavoisier, Paris, France, 2000.
- [7] Mirade P.S., Daudin J.D., A new experimental method for measuring and visualising air flow in large food plants, *J. Food Eng.* 36 (1998) 31–49.
- [8] Ozisik N.M., *Heat transfer: a basic approach*, McGraw-Hill, New York, USA, 1985.
- [9] Pajonk A., La solution flux variables alternants pour homogénéiser l'ambiance, *Rev. Lait. Fr.* 614 (2001) 20–22.
- [10] Peyne D., Analyse numérique de l'aéraulique et des échanges gazeux dans un hâloir de fromagerie, *Mémoire de fin d'études de DESS Ingénierie Mathématique*, Univ. de Savoie, Bourget-du-lac, 2002.
- [11] Peyrin F., Kondjoyan A., Daudin J.D., Analyse des difficultés de mesure de la vitesse de l'air dans les Industries Agro-Alimentaires, *Ind. Alim. Agric.* 10 (1995) 728–735.
- [12] Roger B., Desobry S., Hardy J., Respiration of *Penicillium camemberti* during ripening and cold storage of semi-soft cheese, *Lait* 78 (1998) 241–250.
- [13] Rougier T., Caractérisation expérimentale de l'aéraulique d'un hâloir de fromagerie pilote : mesures de vitesses d'air et de coefficients de transferts chaleur/matière, *Mémoire de fin d'études d'ingénieur CUST et de DEA Sciences des Aliments*, Univ. Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 2002.
- [14] Vassal L., Gripon J.C., L'amertume des fromages à pâte molle de type Camembert : rôle de la présure et de *Penicillium caseicolum*, moyens de la contrôler, *Lait* 64 (1984) 397–417.