

# MODELISATION DES TRANSFERTS THERMIQUES DANS UN JET D'AIR CHAUD EN VUE DE LA DECONTAMINATION DES VIANDES

A. KONDJOYAN\*, M. HAVET\*\*

\*INRA, Station de Recherches sur la Viande, 63122 St Genès Champanelle, France

\*\*ENITIAA, rue de la Géraudière, BP 82225, 44322 Nantes cedex 3, France

## 1. Introduction

La décontamination thermique de la surface des viandes est une idée ancienne qui trouve un regain d'intérêt du fait de l'exigence des consommateurs pour un produit plus sûr et leur réticence face à l'emploi d'additifs chimiques ou de l'irradiation. La revue de l'ensemble des publications scientifiques et les prototypes développés aux USA montrent qu'un traitement thermique diminue significativement la charge microbienne en surface des viandes. Mais les traitements thermiques sont délicats à appliquer et la quantité exacte de micro-organismes détruits suite au traitement reste sujet à controverse. Cette quantité dépend à la fois de facteurs microbiologiques (type et état physiologique du micro-organisme, nature du produit alimentaire) et de la variation des paramètres physiques (température, activité de l'eau) à la surface du produit au cours du traitement. Un programme Européen (programme « BUGDEATH », 5<sup>ième</sup> PCRDT) est en cours pour produire un modèle qui prédise avec fiabilité la décontamination thermique des produits. Ce modèle doit être utilisable par des industriels pour calculer des « barèmes de décontamination ». Il doit donc être simple, rapide et exige : (1) d'établir des lois de létalité des micro-organismes dans des conditions physiques données et (2) de pouvoir prédire très précisément les variations de température à la surface des produits alimentaires au cours des traitements thermiques. Le volet thermique doit être traité conjointement par l'INRA-SRV et l'ENITIAA de Nantes. Le traitement choisi est basé sur l'utilisation d'un jet d'air chaud ou de vapeur. Il doit être suivi d'une phase de refroidissement par l'air. Les échantillons sont des tranches de produits alimentaires orientées parallèlement ou perpendiculairement au jet. Un modèle simple a été élaboré pour décrire les transferts thermiques et une étude de sensibilité a déjà été effectuée dans le cas d'un transfert par convection forcée. Le travail présenté ici évalue les performances du modèle dans le cas d'une viande de poulet soumise à un jet d'air chaud.

## 2. Présentation du modèle

Le problème a été considéré comme un transfert de chaleur en une dimension, c'est-à-dire que le produit a été assimilé à une plaque plane dont les deux dimensions autres que l'épaisseur sont supposées infinies. Une approche mono-dimensionnelle se justifie aisément de par le problème physique traité et par la nécessité d'obtenir un modèle simple exploitable par des industriels. L'évolution de la température dans l'épaisseur du produit  $x$  au cours du temps  $t$  peut être très simplement décrite par l'équation différentielle :

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = D_t \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

Les transferts sur la face inférieure de la tranche de produit (reposant sur un support) sont représentés par la relation suivante :

$$\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{\text{inf}} = h_{\text{inf}} (T_{\text{support}} - T_{\text{inf}}) \quad (2)$$

$T_{\text{inf}}$  étant la température de la face inférieure du produit,  $T_{\text{support}}$  celle du support et  $h_{\text{inf}}$  un coefficient qui décrit les échanges par conduction entre le support et le produit et qui représente une condition limite.

La condition limite sur la face supérieure du produit doit prendre en compte les échanges par convection, par rayonnement et par changement d'état. Les parois entourant le produit sont supposées être des corps noirs à la même température que l'air (hypothèse souvent vérifiée en pratique). Lors d'un transfert chaleur-eau couplé, la valeur du coefficient de transfert de matière peut être calculée à partir de celle du coefficient de transfert de chaleur en utilisant la relation de Lewis. La condition limite peut alors être écrite sous la forme :

$$\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{\text{sup}} = \left( \underset{\text{(I)}}{h + \varepsilon \sigma} \frac{T_{\text{air}} - T_{\text{sup}}}{T_{\text{air}} - T_{\text{sup}}} + \underset{\text{(II)}}{h} \frac{C_p M_{\text{air}} P_{\text{atm}}}{M_{\text{eau}}} (Le)^{0.67} \Delta H \frac{P_{\text{Td}} - a_{\text{ws}} P_{T_{\text{sup}}}}{T_{\text{air}} - T_{\text{sup}}} \right) (T_{\text{air}} - T_{\text{sup}}) \quad (3)$$

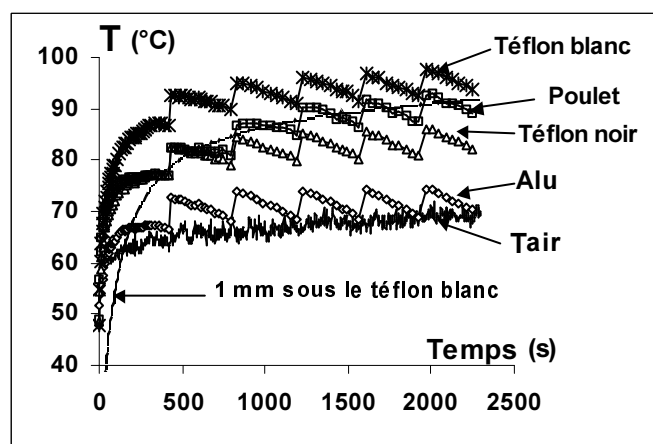
Les termes (II) et (III) peuvent être considérés comme deux coefficients de transfert,  $h_{\text{rad}}$  et  $h_{\text{état}}$ , variables au cours du temps et décrivant respectivement les transferts par rayonnement et changement d'état à la surface du produit. La somme de  $h$ ,  $h_{\text{rad}}$ ,  $h_{\text{état}}$  est considérée comme un coefficient de transfert classiquement nommée coefficient de transfert effectif,  $h_{\text{eff}}$ .

Les équations (1), (2) et (3) ont été discrétisées par une méthode aux différences finies et en utilisant le schéma numérique implicite du deuxième ordre de Crank-Nicolson (implémentation sous matlab 5.2). Lors de la résolution du système, la valeur du coefficient de transfert effectif a été recalculée à chaque pas de temps à partir des valeurs actualisées des différentes variables. La précision des résultats dépend du maillage numérique et du pas de temps utilisés. L'utilisation d'un pas de temps variable auto-adaptatif permet de calculer sur un micro-ordinateur de type PC l'évolution de la température de surface à +/- 0.05°C près et en quelques dizaines de secondes.

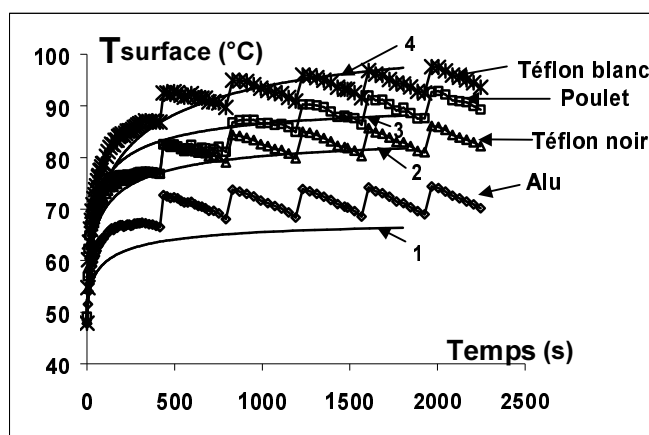
### 3. Protocole expérimental

Les expériences ont été effectuées sur de petits échantillons de téflon ou de viande de poulet de surface 1cm x 1cm et d'épaisseur variant entre 1.5 cm et 3.0 cm. Ces petits échantillons étaient placés dans un support en téflon, et entourés de pièces de garde également en téflon, de manière à ce que l'ensemble (échantillon + pièces de garde) constitue un bloc de 5cm x 5cm x 3cm. Le bloc était placé à 15 cm de la sortie d'un pistolet à air chaud et de façon à ce que la surface de 5cm x 5cm du bloc soit perpendiculaire au jet. Lors des expériences, certaines des parties du bloc de téflon étaient peintes en noir ou recouvertes partiellement de bandes en aluminium. Deux thermocouples étaient placés l'un dans le bec du pistolet à air chaud et l'autre à 1 cm au dessus de l'échantillon. Un thermocouple était également positionné à environ 1 mm sous la surface d'un des échantillons en téflon. Les thermocouples étaient reliés à une centrale de mesure elle-même connectée à un ordinateur. Une caméra infrarouge munie d'une unité de traitement permettait de suivre l'évolution des températures en surface des échantillons. Lors d'une expérience, le pistolet était préchauffé pendant quelques minutes pour que les conditions de soufflage soit constantes. Puis l'échantillon était soumis au jet d'air chaud durant 20 à 30 minutes, au cours desquelles l'ensemble des températures étaient enregistrées toutes les 5 minutes. Les images infrarouges étaient ensuite visualisées et traitées en utilisant des programmes développés sous l'environnement matlab 5.2 (« image processing toolbox »). Les opérations d'étalonnage des thermocouples et de calibrage de la caméra infrarouge permettaient d'assurer une mesure des températures à  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  près. Dans un jet, les répartitions de vitesse et de température d'air sont très hétérogènes. Des quadrillages physiques effectués avant et après l'expérience permettaient de connaître les répartitions exactes de vitesse et de température d'air qui arrivaient au contact du bloc de téflon.

### 4. Résultats



**Figure 1 :** Températures mesurées sur du téflon et du poulet soumis à un jet d'air chaud à 5 m/s et 66°C. La température du bec est de 175°C.



**Figure 2 :** Comparaison entre valeurs expérimentales (Fig.1) et calculées avec : (1)  $U = 4,0 \text{ m/s}$ ,  $T_u = 20\%$ ,  $T_{air} = 65^\circ\text{C}$ ,  $\epsilon = 0,2$  ; (2)  $U = 4,0 \text{ m/s}$ ,  $T_u = 20\%$ ,  $T_{air} = 65^\circ\text{C}$ ,  $\epsilon = 0,99$  ; (3)  $U = 5,0 \text{ m/s}$ ,  $T_u = 20\%$ ,  $T_{air} = 75^\circ\text{C}$ ,  $\epsilon = 0,99$  ; (4)  $U = 1,0 \text{ m/s}$ ,  $T_u = 20\%$ ,  $T_{air} = 75^\circ\text{C}$ ,  $\epsilon = 0,99$ .

La figure 1 présente des cinétiques de température mesurées sur du téflon et sur un échantillon de viande de poulet recouvert de sa peau. Les résultats montrent l'importance des échanges par rayonnement liés à la température du bec du pistolet. Lorsque l'émissivité du produit est faible, comme dans le cas de l'aluminium, la température de surface en fin d'expérience est proche de celle de l'air. Par contre, pour des émissivités plus élevées, la température d'équilibre en fin d'expérience est intermédiaire entre la température de l'air et celle du bec du pistolet. La température des surfaces de téflon blanche et peinte en noir sont voisines montrant que la valeur de l'émissivité du téflon poreux utilisé au cours des expériences est très différente de celle du téflon de couverture lisse donnée par la littérature ( $\epsilon = 0,38$ ). La cinétique de température mesurée en surface du poulet est très voisine de celle obtenue sur le téflon, ce qui montre que l'évaporation en surface du poulet est très faible au cours de l'expérience. La température mesurée 1 mm sous de la surface du téflon blanc est très différente de celle mesurée en surface, ce qui montre la nécessité d'utiliser : (1) des systèmes à infrarouge pour effectuer les mesures et (2) des modèles de calculs avec des maillages numériques suffisamment précis pour décrire les transferts de surface.

La figure 2 présente les résultats calculés à partir du modèle en tenant compte de la vitesse et de la température d'air mesurés au dessus de chacune des surfaces considérées (téflon blanc, téflon noir et échantillon de poulet). Les valeurs des coefficients de transferts  $h$ ,  $k$  introduites dans le modèle proviennent de mesures effectuées auparavant en soufflerie dans les mêmes conditions. Les propriétés thermophysiques (conductivité et diffusivité thermiques) sont celles données par la littérature pour le téflon à 23°C. L'émissivité du produit  $\epsilon$ , est considérée comme étant égale à 0,20 quand il s'agit d'aluminium et à 0,99 dans les autres cas. Globalement, les résultats calculés sont en bon accord avec l'expérience, mais ils dépendent énormément des caractéristiques du produit ( $\lambda$ ,  $\epsilon$ ), qui demanderaient donc à être mesurées précisément. D'autre part, pour pouvoir d'écrire les autres situations rencontrées en pratique, il faudrait, dans le modèle de rayonnement, tenir compte de l'orientation du jet par rapport à la surface du produit. Enfin, une dégradation de la surface de la peau de poulet (fusion des graisses) est observée visuellement lors des expériences dès que la température en surface de l'échantillon devient supérieure à 65-70°C. Cet aspect sera à prendre en compte lors du choix des protocoles de décontamination.

**Conclusion :** Le modèle permet effectivement de décrire les résultats expérimentaux. La mesure des propriétés thermophysiques et des expériences supplémentaires sont nécessaires à sa bonne validation.