



**HAL**  
open science

# Instrumentation d'un four pilote pour la cuisson de génoise

Imen Douiri

► **To cite this version:**

Imen Douiri. Instrumentation d'un four pilote pour la cuisson de génoise. Sciences de l'ingénieur [physics]. ENSIA (AgroParisTech), 2007. Français. NNT : 2007AGPT0085 . pastel-00004531

**HAL Id: pastel-00004531**

**<https://pastel.hal.science/pastel-00004531>**

Submitted on 13 Jan 2009

**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.

**Ecole Nationale Supérieure  
des Industries Agricoles et Alimentaires**

Ecole doctorale Agriculture, Alimentation, Biologie, Environnements et Santé

**THESE DE DOCTORAT**

Spécialité Génie des Procédés

**Instrumentation d'un four pilote  
pour la cuisson de génoise**

présentée par

**Imen DOUIRI**

Thèse dirigée par Elisabeth DUMOULIN  
Soutenue le 31 Janvier 2007

Jury :

Mr Jean-Pierre PAIN, Professeur à l'Université Montpellier II

Mr Joël ABECASSIS, Directeur de Recherche INRA

Mr Arsène ISAMBERT, Professeur à l'Ecole Centrale de Paris

Mme Elisabeth DUMOULIN, Professeur à l'ENSIA

Mr Alain SOMMIER, Ingénieur de recherche à l'ENSIA

Mr Marc VIGNOLLES, Ingénieur Groupe Marie

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur







## *Remerciements*

Ce travail a été réalisé au sein de l'équipe automatique et conduite des procédés du département Génie Industriel Alimentaire de l'ENSIA.

Je tiens à remercier les membres du jury : Monsieur Joël Abecassis, directeur de Recherche à l'INRA ; Monsieur Jean-Pierre Pain professeur à l'université de Montpellier II ; Monsieur Arsène Isambert professeur à l'Ecole Centrale de Paris et Monsieur Marc Vignolles ingénieur développement procédés du groupe Marie qui ont accepté de juger ce travail. Madame Elisabeth Dumoulin professeur à l'ENSIA et Monsieur Alain Sommier ingénieur de recherche à l'ENSIA qui ont encadré la thèse.

Je souhaite tout d'abord remercier Elisabeth Dumoulin et Alain Sommier qui m'ont encadrée pendant la thèse, m'ont accordé leur confiance et financé ma thèse. Merci à Madame Dumoulin, pour ses conseils scientifiques et son implication. Son expérience, sa précision et ses recommandations m'ont permis d'accorder de l'importance aux détails pour bien rédiger la thèse et mener à bien les expériences et apprendre au fur et à mesure le métier de la recherche. Merci à Alain Sommier, qui m'a accueilli pendant le DEA et qui m'a accordé sa confiance pour une deuxième expérience pendant la thèse. Merci de m'avoir appris l'instrumentation et la conduite des procédés, pour l'appui qu'il m'a accordé tant sur le plan scientifique que sur le plan humain pour bien orienter mon travail. Merci Alain pour l'agréable ambiance de travail que tu as instaurée avec beaucoup de respect et une grande qualité humaine.

Merci à Gilles Trystram de m'avoir accordé de son temps, merci pour ses précieux conseils et ses idées qui nous ont permis de construire, d'orienter et mener à bien le sujet de thèse.

Je tiens à remercier Christophe Chipeaux pour sa contribution dans la partie traitement d'images, pour sa présence, sa patience et son sérieux face aux problèmes d'acquisition de mesures et informatiques. Merci également à Robert Sawka pour son aide et son expérience dans la confection de pièces et matériels, et à Valérie Lalanne et Odile Mathieu qui m'ont été d'une grande aide pour les mesures en DSC.

Merci à Martine Decloux, Albert Duquenoy, Bertrand Broyart et Fabrice Ducept pour leur aide et leurs conseils.

Je tiens à remercier tout le personnel de l'ENSIA et l'équipe du GIA et tout particulièrement Monique Belgome, Michèle Braz Dos Santos, Colette Maillard, Michèle Coccoluto, Saïd Moussa, Richard Lewandowski, Sabine Lacour et Aurélien Neveu pour leur gentillesse et leur soutien. Ainsi qu'à Eduardo Castillo Castaneda pour son amitié, son encouragement et ses conseils.

Je ne pourrai pas finir sans remercier mes amis et collègues thésards, qui m'ont été d'un grand soutien tout au long de la thèse et avec qui je garderai les plus beaux souvenirs : Ladan, Estelle et leurs familles, Anay, Betty, Mouin, Nader, Grégoire, Téréza, Thibaud, Richard, Camille, Houssem, Mohammad, Ali, Nawel, Nejla, Alescandro, et les nouveaux thésards Emilie, Souad, Ali et Marjorie. Merci également à Vincent et sa famille, avec qui j'ai partagé de merveilleux moments.

Un grand merci à Mr et Mme Amer qui m'ont été d'un énorme soutien moral, merci pour leur exceptionnelle générosité et gentillesse. Merci aussi à mes copines : Nadia, Hodhouda, Kouty, Gabry et Bice synonymes de fraternité dévotion et joie de vivre.

J'exprime ma gratitude, mon respect et mon amour, à ceux qui m'ont permis de vivre cette expérience en France, qui m'ont accordé leur confiance, qui m'ont soutenu, encouragé, aidé continuellement, à ceux à qui je dédie ce travail : Mes parents.

Merci à mes frères Ghazi et Badreddine et leurs familles ainsi qu'à ma sœur Rym qui ont toujours su être présents pour moi malgré la distance.

Merci à mon futur époux, Fahmi, qui m'a soutenu et encouragé tous les jours. Merci pour tout.



## TABLE DES MATIERES

<b>1. ETAT DE L'ART.....</b>	<b>29</b>
1.1 INSTRUMENTATION DES FOURS DE CUISSON.....	31
1.1.1 <i>Les fours</i> .....	31
1.1.2 <i>Les différents modes de transfert de chaleur</i> .....	35
1.1.3 <i>Mesures des paramètres de cuisson</i> .....	37
1.2 CUISSON DES PRODUITS DE TYPE GENOISE .....	43
1.2.1 <i>Définition de la génoise</i> .....	43
1.2.2 <i>Préparation et enfournement</i> .....	45
1.2.3 <i>La cuisson : température et temps de cuisson</i> .....	45
1.2.4 <i>Le refroidissement</i> .....	45
1.3 MODIFICATIONS DU PRODUIT PENDANT LA CUISSON .....	47
1.3.1 <i>Réactions biochimiques intervenant pendant la cuisson</i> .....	47
1.3.2 <i>Transfert de chaleur et de matière dans le produit</i> .....	49
1.3.3 <i>Modifications physiques du produit</i> .....	53
1.4 CONCLUSION.....	59
<b>2. MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>61</b>
2.1 PRODUIT : LA PATE A GENOISE.....	63
2.2 LE MOULE DE CUISSON .....	65
2.3 LE FOUR DE CUISSON .....	65
2.4 INSTRUMENTATION POUR DES ESSAIS DE CUISSON ET ACQUISITION DES DONNEES .....	67
2.4.1 <i>Le four et l'air de chauffage</i> .....	67
2.4.2 <i>Les mesures de flux de chaleur reçus par le produit dans le moule</i> .....	71
2.4.3 <i>Flux radiatifs et convectifs</i> .....	71
2.5 MESURES SUR LE PRODUIT PENDANT LA CUISSON .....	73
2.5.1 <i>Pesée du produit dans le moule</i> .....	73
2.5.2 <i>Températures à l'intérieur du produit</i> .....	75
2.5.3 <i>Température de surface du produit</i> .....	75
2.5.4 <i>Pression interne</i> .....	77
2.5.5 <i>Gonflement</i> .....	77
2.6 METHODES D'ANALYSES POUR LE PRODUIT AVANT OU APRES CUISSON.....	79
2.6.1 <i>Activité de l'eau, aw</i> .....	79
2.6.2 <i>Teneur en eau</i> .....	81
2.6.3 <i>Capacité thermique et conductivité thermique</i> .....	81
2.6.4 <i>Mesure de la couleur</i> .....	83
2.6.5 <i>Texture du produit cuit</i> .....	85
2.6.6 <i>Images (alvéoles) du produit cuit</i> .....	87
2.6.7 <i>Volumes initial et final</i> .....	87
2.6.8 <i>Croûte/ mie épaisseur</i> .....	89
2.6.9 <i>Conduite d'un essai de cuisson</i> .....	89
<b>3. RESULTATS ET DISCUSSION .....</b>	<b>91</b>
3.1 HOMOGENEITE DE LA TEMPERATURE DE L' AIR DANS LE FOUR ET FLUX DE CHALEUR .....	93
3.1.1 <i>Température de l'air dans le four</i> .....	93
3.1.2 <i>Flux de chaleur convectif et radiatif</i> .....	95
3.1.3 <i>Conclusion</i> .....	99
3.2 CUISSON DE LA GENOISE A 160°C.....	101
3.2.1 <i>Profils de températures</i> .....	101
3.2.2 <i>Cinétiques de perte de masse et variation de l'humidité relative de l'air</i> .....	103
3.2.3 <i>Gonflement et pression interne</i> .....	105
3.2.4 <i>Variation de masse, hauteur/volume et masse volumique</i> .....	105
3.2.5 <i>Relation entre flux de chaleur et gonflement</i> .....	107
3.2.6 <i>Conclusion sur les résultats de la cuisson de génoise à 160°C</i> .....	107
3.3 COMPARAISON DE LA CUISSON DE GENOISE A DIFFERENTES TEMPERATURES .....	111
3.3.1 <i>Aspect général du produit cuit</i> .....	111



3.3.2	<i>Température</i> .....	113
3.3.3	<i>Perte de masse</i> .....	115
3.3.4	<i>Hauteur et volume</i> .....	117
3.3.5	<i>Masse volumique</i> .....	119
3.3.6	<i>Propriétés du produit</i> .....	121
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b> .....		<b>127</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....		<b>133</b>
<b>ANNEXE 1 : CARTOGRAPHIE THERMIQUE DU FOUR</b> .....		<b>141</b>
<b>ANNEXE 2 : DETERMINATION DE L'EMISSIVITE DE LA GENOISE</b> .....		<b>143</b>
<b>PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS</b> .....		<b>145</b>



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Classification des fours de boulangerie et pâtisserie (d'après Guinet, 1992) .....	30
Tableau 2 - Systèmes colloïdaux des pâtes et gâteaux (d'après Mizukoshi, 1990) .....	42
Tableau 3 - Température et temps de cuisson pour trois types de gâteau (Pylar, 1973).....	44
Tableau 4 - Etalonnage des vitesses de rotation du mixer utilisé pour préparer la pâte .....	62
Tableau 5 - Recette de la génoise.....	62
Tableau 6 - Variation maximale de la température de l'air du four et moyenne de la vitesse d'air mesurée pour trois températures de consignes.....	66
Tableau 7 : sensibilité des capteurs de flux .....	72
Tableau 8 - Certificat d'étalonnage TMI Orion N° P41848.....	74
Tableau 9 - Teneur en eau des différents ingrédients de la pâte.....	80
Tableau 10 - Densités de flux mesurées par les capteurs brillants et noirs dans les différentes positions (deux répétitions par position).....	96
Tableau 11 - Coefficient de transfert de chaleur convectif ( $h_c$ , $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ) et global ( $h$ , $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ) calculés au niveau de différentes positions de la plaque .....	96
Tableau 12 - Comparaison des masses volumiques pendant la cuisson, mesurées et calculées (traitement d'images, $160^\circ C$ - $3,5$ m/s).....	106
Tableau 13 - Comparaison des valeurs pasteurisatrice ( $z = 7^\circ C$ , Tréf = $70^\circ C$ ) et cuisatrice ( $z$ = $30^\circ C$ , Tréf = $100^\circ C$ ) pour les températures de consigne de $160$ , $180$ et $220^\circ C$ .....	112
Tableau 14 - Perte de masse ( $m/m_0$ ) après le chauffage et le refroidissement de la génoise pour trois températures de chauffage ( $160^\circ C$ , $180^\circ C$ , $220^\circ C$ ). (Moyenne de trois répétitions) .....	116
Tableau 15 - Variation de hauteur et de volume de la génoise pour trois températures de chauffage ( $160^\circ C$ , $180^\circ C$ , $220^\circ C$ ). ( $H$ : hauteur enregistrée en fin de chauffage et en fin du refroidissement / $H$ ; $H_0$ : hauteur initiale).....	116
Tableau 16 - Variation de la masse volumique de la génoise pour trois températures de cuisson. $160^\circ C$ - $180^\circ C$ - $220^\circ C$ . ( $\rho$ : masse volumique en fin de chauffage et après refroidissement ; $\rho_0$ : masse volumique initiale).....	119
Tableau 17 - Comparaison des paramètres pouvant influencer la texture de la génoise.....	124
Tableau 18 - Capacité thermique et teneur en eau des différents constituants de la pâte à $20^\circ C$ .....	124
Tableau 19 - Capacité thermique massique, masse volumique et conductivité thermique de la pâte et des génoises cuites à $160^\circ C$ , $180^\circ C$ et $220^\circ C$ mesurées par CT mètre à température ambiante.....	124



## LISTE DES FIGURES.

Figure 1 : Four ménager instrumenté pour la cuisson de produits céréaliers (Sommier et Douiri, 2006).	32
Figure 2 : Four pilote modèle (Mizukoshi <i>et al</i> , 1979).	34
Figure 3 : Les différents type de transferts de chaleur (Sommier <i>et al</i> , 2002).	34
Figure 4 : Capteur pour la mesure de h : (a) vue générale, (b) et (c) détail de l'élément sensible.	40
Figure 5 : Schéma technique du capteur de flux et du capteur de surface du moule : (a) coupe du ceps du capteur à l'intérieur duquel une cellule de mesure cylindrique. (b) vue d'une moitié du cylindre qui constitue la cellule. Un détail est représenté à la Figure 6	42
Figure 6 : Image du capteur montrant les fils de thermocouples tout au long des isothermes.	42
Figure 7 : Processus de cuisson d'un biscuit. Distribution des phénomènes de cuisson dans le temps et l'espace (Manley, 2000).	44
Figure 8 : Thermogramme d'une pâte à pain sans levure (He et Hosoney, 1991).	46
Figure 9 : Profil de température interne pendant la cuisson de différents produits céréaliers (Audidier, 1968)	48
Figure 10 : Perte de masse pendant la cuisson de différents produits céréaliers (Audidier, 1968)	50
Figure 11 : Appareil pour la mesure du volume de la pâte à génoise et la température de dégagement de gaz (Mizukoshi <i>et al</i> , 1980).	52
Figure 12 : Cinétique de variation de la pression interne sur 2 essais (160 °C, 80 min, Sommier <i>et al</i> , 2002).	52
Figure 13 : Principe de fonctionnement du batteur planétaire.	62
Figure 14 : Moule de cuisson ( $\phi = 25 \text{ cm}$ ; $H = 10 \text{ cm}$ )	64
Figure 15 : Four pilote instrumenté.	64
Figure 16 : Dispositif utilisé pour mesurer la vitesse de l'air dans le four (anémomètre $\phi = 3,5 \text{ cm}$ $L = 20\text{cm}$ )	66
Figure 17 : Position des thermocouples adhésifs dans la cellule de cuisson pour la mesure de la température des parois du four.	68
Figure 18: Thermopile planaire.	70
Figure 19 : Cellule fluxmétrique.	70
Figure 20 : Méthode de fabrication du capteur de flux (documentation Captec®)	70
Figure 21 : Exemple de fluxmètre.	72
Figure 22 : Position des capteurs de flux sur la plaque d'étude.	72
Figure 23 : Cinétique de perte de masse de l'eau dans une boîte de conserve (160°C - 3,5m/s).	74
Figure 24 : Capteur autonome de pression et température (NanoVACQ NVQ/PT-TC $\phi = 3,5 \text{ cm}$ , $L = 3,5\text{cm}$ )	74
Figure 25 : Etapes de traitement des images prises à travers la fenêtre du moule.	76
Figure 26 : Obtention des images en cours de cuisson de pâte dans un moule, a) Moule passé au noir de fumée b) Exemple d'image prise dans les conditions initiales c) Résultat de l'augmentation du contraste	76
Figure 27 : Schéma de positionnement moule-caméra	76
Figure 28 : Détermination de la hauteur de pâte dans le moule en cours de cuisson : utilisation d'un repère fixe	78
Figure 29 : Schéma de principe du calorimètre différentiel à balayage.	82
Figure 30 : Sonde utilisée pour la mesure de la conductivité thermique de la pâte et de la génoise cuite (CTmètre).	82



Figure 31 : (a) Solide des couleurs, (b) Plan de coupe du solide des couleur pour L constant, (c) Luminance en fonction de la chromacité (site Minolta Europe).....	84
Figure 32 : Position de mesure de la couleur, de l'épaisseur de la croûte et de la mie de la génoise .....	86
Figure 33 : Test de compression (TAXT2).....	86
Figure 34 : Essai de compression (50%) relaxation (30min) sur un disque de génoise ( $\phi = 4$ cm, H = 3 cm).....	86
Figure 35 : Schéma général du système d'acquisition. ....	88
Figure 36 : Etapes de réalisation d'un essai de cuisson d'une génoise .....	88
Figure 37 : Les niveaux de mesure des températures dans le four .....	92
Figure 38 : Cartographie thermique du four aux 4 niveaux du four (160 °C – 3,5 m/s).....	92
Figure 39 : Profil de température pour chaque plan vertical du four (160 °C – 3,5 m/s).....	92
Figure 40 : Profil de température pour chaque plan vertical du four (150 °C – 3,5 m/s).....	94
Figure 41 : Profil de température pour chaque plan vertical du four (170 °C – 3,5 m/s).....	94
Figure 42 : Densités de flux mesurées par les capteurs brillants et noirs dans les différentes positions (deux répétitions par position).....	96
Figure 43 : Evolution des températures (ambiance ; interne et surface produit ; fond du moule), de la masse et de l'épaisseur en cours de cuisson de génoise (160 °C, 3,5 m/s) .....	100
Figure 44 : Représentation des températures, de la structure du produit et des flux de chaleur vus par le produit.....	100
Figure 45 : Répétabilité de la cinétique de perte en masse de la génoise validée sur 3 essais de cuisson. Four (160 °C – 3,5 m/s).....	102
Figure 46 : Epaisseur de produit et perte en masse (moyenne sur 3 essais 160 °C - 3,5 m/s).....	102
Figure 47 : Comparaison entre la pression mesurée (capteur TMI Orion) et la pression corrigée par étalonnage pour la génoise (160 °C – 3,5 m/s).....	104
Figure 48 : Pression et température mesurées dans la pâte en cours de cuisson par le capteur autonome TMI Orion (160 °C - 3.5 m/s).....	104
Figure 49 : Suivi de la pression et de la température interne pendant la cuisson (chauffage et refroidissement après défournement) de la génoise (160 °C - 3,5 m/s) .....	104
Figure 50 : Evolution du volume et de la masse volumique (moyenne sur 3 essais 160 °C - 3,5 m/s) .....	106
Figure 51 : a) Points de mesure de la hauteur – b) Moyenne des hauteurs mesurées à 5 positions de la génoise .....	106
Figure 52 : Tranches de génoise cuite (a) 160°C ; (b) 180°C ; (c) 220°C (Vair = 3,5 m/s).....	110
Figure 53 : Variation de la température du four, de la température de surface et des températures internes de la génoise pendant le chauffage et le refroidissement aux trois températures de cuisson. ....	112
Figure 54 : Perte de masse relative pour chaque température de cuisson .....	114
Figure 55 : Evolution de la hauteur de la génoise pendant la cuisson à 160°C, 180°C et 220°C. ....	114
Figure 56 : Evolution du volume de la génoise pour les 3 températures de cuisson. ....	118
Figure 57 : Variation de la masse volumique de génoise au cours des cuissons à 160, 180, 220 °C. (Chauffage : masse mesurée/volume calculé ; fin refroidissement $\rho_{finale} =$ masse mesurée/volume mesuré avec graines) .....	120
Figure 58 : L, a, b pour les différentes températures (160°C-180°C- 220°C) et position de mesures (1,5,3). ....	122
Figure 59 : Représentation de la valeur de L en fonction du chroma .....	122
Figure 60 : Test de compression sur la mie de génoise en fonction de la distance d'écrasement (160, 180, 220 °C) .....	124



Figure 61 : Cartographie thermique du four aux 4 niveaux du four, 150°C - 25Hz.....	141
Figure 62 : Cartographie thermique du four aux 4 niveaux du four, 170°C - 25Hz.....	141
Figure 63 : Variation de la température des parois du four : supérieure, inférieure et à l'entrée de la cellule de cuisson ( $T_{\text{air}} = 160^{\circ}\text{C}$ , $v_{\text{air}} = 3,5 \text{ m/s}$ ).....	142
Figure 64 : Variation des températures des parois supérieure et inférieure (mesures effectuées au centre). $T = 160^{\circ}\text{C}$ $V = 3,5 \text{ m/s}$ . ....	142
Figure 65 : Détermination de l'émissivité de la génoise .....	143
Figure 66 : Ecart entre max et min de la température de la génoise et de la température de la surface en fonction de l'émissivité .....	143



## NOTATIONS

A : surface ( $m^2$ ).

A' : distance sol – caméra (m).

C : distance four – caméra (m).

Cp : capacité thermique ( $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ ).

D<sub>h</sub> : diamètre hydraulique (m).

e : épaisseur (m).

E : module d'Young (Pa).

F : facteur de vue.

Fa : force appliquée (N)

h : coefficient de transfert de chaleur apparent ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ ).

h<sub>c</sub> : coefficient de transfert de chaleur par convection ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ ).

h<sub>contact</sub> : coefficient de transfert de chaleur par contact ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ ).

h<sub>r</sub> : coefficient de transfert de chaleur par radiation, ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ ).

H : hauteur (m).

H<sub>0</sub> : hauteur initiale du produit (m).

H<sub>p</sub> : hauteur réelle du produit (m).

H<sub>m</sub> : hauteur du produit vue par la caméra (m).

i : constituant.

IR : infra rouge.

k : coefficient correcteur.

L : longueur (m).

L<sub>0</sub> : longueur initiale (m).

l : largeur (m).

n : niveau de la grille dans le four.

m : masse (g).

m<sub>0</sub> : masse initiale (g)

m<sub>f</sub> : masse finale de l'échantillon sec

p : position des thermocouples sur la grille.

P : pression (bar).

R : rayon (m).

Re : nombre de Reynolds.



$S$  : section ( $m^2$ ).  
 $t$  : temps (s).  
 $T$  : température (K,  $^{\circ}C$ ).  
 $T'$  : température de surface du cylindre (K).  
 $T_{air}$  : température de l'air du four (K,  $^{\circ}C$ ).  
 $T_{fluide}$  : température du fluide caloporteur (K,  $^{\circ}C$ ).  
 $T_{produit}$  : température de surface du produit en contact avec le support (K,  $^{\circ}C$ ).  
 $T_r$  : température de la surface rayonnante (K).  
 $T_{réf}$  : température de référence ( $^{\circ}C$ ).  
 $T_s$  : température de surface (K,  $^{\circ}C$ ).  
 $T_{SB}$  : température de surface du capteur brillant ( $^{\circ}C$ ).  
 $T_{SN}$  : température de surface du capteur noir ( $^{\circ}C$ ).  
 $T_{support}$  : température du support (K,  $^{\circ}C$ ).  
 $T_1$  à  $T_4$  : températures internes du produit ( $^{\circ}C$ ).  
 $T'1$  à  $T'6$  : températures mesurées dans la largeur du four ( $^{\circ}C$ ).  
 $T_5$  et  $T_6$  : températures du fond du moule ( $^{\circ}C$ ).  
 $v$  : vitesse ( $m.s^{-1}$ ).  
 $v_{air}$  : vitesse de l'air ( $m.s^{-1}$ ).  
 $V_c$  : valeur cuisatrice (min).  
 $V_d$  : vitesse de variation de la densité ( $kg.m^{-3}.s^{-1}$ ).  
 $V_H$  : vitesse de gonflement ( $mm.s^{-1}$ ).  
 $V_{initial}$  : volume initial ( $m^3$ ).  
 $V_m$  : vitesse de perte de masse ( $g.s^{-1}$ ).  
 $V_p$  : valeur pasteurisatrice (min).  
 $V_s$  : volume de la calotte sphérique ( $m^3$ ).  
 $V_{total}$  : volume total ( $m^3$ ).  
 $V_v$  : vitesse de variation du volume ( $l.s^{-1}$ )  
 $x$  : fraction massique.  
 $X$  : teneur en eau (g d'eau/100g MS).  
 $z$  : l'écart de température nécessaire pour varier le temps de réduction décimale d'un facteur 10 pour un germe donné ( $^{\circ}C$ ).  
 $\Delta L$  : allongement (m).  
 $\varepsilon$  : émissivité de la surface du produit.  
 $\varepsilon_L$  : allongement



$\varepsilon_N$  : émissivité du capteur noir.

$\varepsilon_B$  : émissivité du capteur brillant.

$\varepsilon'$  : porosité.

$\lambda$  : conductivité thermique ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ).

$\nu$  : viscosité cinématique ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ).

$\pi$  : 3,1416.

$\rho$  : masse volumique ( $\text{kg.m}^{-3}$ ).

$\rho_0$  : masse volumique initiale ( $\text{kg.m}^{-3}$ ).

$\rho_{\text{finale}}$  : masse volumique après refroidissement ( $\text{kg.m}^{-3}$ ).

$\sigma$  : constante de Stephan-Boltzman,  $5,67.10^{-8}$  ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ).

$\tau$  : contrainte (Pa).

$\Phi_B$  : densité de flux reçue par le capteur brillant ( $\text{W.m}^{-2}$ ).

$\Phi_c$  : densité de flux de chaleur par convection ( $\text{W.m}^{-2}$ ).

$\Phi_{\text{contact}}$  : densité de flux de chaleur par contact ( $\text{W.m}^{-2}$ ).

$\Phi_N$  : densité de flux reçue par le capteur noir ( $\text{W.m}^{-2}$ ).

$\Phi_r$  : densité de flux de chaleur par radiation ( $\text{W.m}^{-2}$ ).

$\Phi_{r_B}$  : densité de flux de chaleur par radiation reçue par le capteur brillant ( $\text{W.m}^{-2}$ ).

$\Phi_{r_N}$  : densité de flux de chaleur par radiation reçue par le capteur noir ( $\text{W.m}^{-2}$ ).

$\Phi_t$  : densité de flux totale ( $\text{W.m}^{-2}$ ).

$\emptyset$  : diamètre (m).



## INTRODUCTION

La cuisson est une opération unitaire qui utilise la chaleur pour provoquer la réduction ou l'inhibition de matières biologiques indésirables (enzymes, microorganismes...) et/ou le changement des propriétés physiques du produit (couleur, texture, volume...) visant à obtenir une certaine qualité de produit fini.

Cette opération prend une place stratégique dans la chaîne de transformation de produits alimentaires (restauration hors foyer, moyennes et grandes entreprises) où la matière première (viande, pâte, poisson, ...) est convertie en produit de consommation.

Les industries de transformation des produits céréaliers proposent continuellement de nouveaux produits pour arriver à satisfaire les demandes du consommateur et assurer leur place sur le marché des produits alimentaires. Ces objectifs doivent être associés à un faible coût de production, une qualité constante du produit (dont la sécurité alimentaire), avec une bonne efficacité du procédé en termes de productivité et flexibilité.

Ces objectifs sont atteints à travers l'optimisation et le contrôle du procédé qui nécessite une bonne compréhension de ce dernier ainsi que du produit à transformer. Il est nécessaire de rassembler le plus d'informations possibles traduisant les changements qui se produisent au cours de la cuisson de manière à pouvoir les traiter et les interpréter pour faciliter le contrôle, l'automatisation ou la prise de décision.

Dans ce sens, le choix et l'utilisation des capteurs de mesure fournissant des réponses en fonction du temps est devenu indispensable pour réduire la complexité apparente des phénomènes se produisant pendant la cuisson. Dans les fours industriels continus, l'installation de capteurs en ligne est très limitée à cause des conditions et paramètres de cuisson (dimensions du procédé, températures élevées de cuisson, accessibilité limitée). De plus, les capteurs doivent être fiables et robustes tout au long de la mesure.

La réalisation d'un dispositif expérimental finement instrumenté pourrait fournir des éléments de réponses nécessaires pour caractériser les produits pendant la cuisson. L'avantage de l'utilisation d'un four pilote sera de suivre en temps réel les modifications du produit par plusieurs capteurs installés de manière à ne pas changer les conditions opératoires ni détruire ou sortir le produit, dans des conditions facilement répétables et fournissant des données exploitables numériquement. En plus du suivi pendant la période de chauffage, l'installation peut permettre de suivre les mêmes paramètres pendant la période de refroidissement permettant de réaliser une étude globale et précise des modifications du produit au cours de la cuisson (chauffage + refroidissement).

Ce projet est la suite de deux études réalisées en 2001 à l'ENSIA. La première, au sein du laboratoire de Science de l'aliment, avait pour but de mettre au point une recette de génoise sans matière grasse, sans émulsifiant et agent levant, avec la meilleure expansion possible. Le deuxième projet, réalisé au sein du laboratoire de Génie des procédés alimentaires a eu pour objectif d'utiliser cette recette et de suivre la cuisson de la génoise en moule dans le four pilote Servathin. Une première approche d'instrumentation a été proposée (masse, températures internes, hauteur, pression).

Lors de notre étude, nous avons continué dans cet axe de recherche en développant les méthodes d'instrumentation et de caractérisation des fours (cartographie en température et en flux de chaleur) et en utilisant de nouvelles méthodes de suivi des propriétés du produit. Les ingrédients, la recette et les paramètres du procédé de cuisson que nous avons adoptés sont ceux fournis par les deux précédents projets.

En premier lieu, nous présentons une étude bibliographique sur la cuisson des produits céréaliers et plus précisément sur l'instrumentation des fours et les capteurs de mesures



utilisés pour le suivi des modifications du produit pendant la cuisson. Cette étude a permis de mieux définir les paramètres à suivre et les capteurs existants permettant de fournir les informations nécessaires dans la gamme des températures utilisées en cuisson.

Ensuite, nous avons caractérisé l'enceinte de cuisson pour s'assurer de la répétabilité des conditions opératoires. Dans ce but, des capteurs ont été choisis, installés, et un système d'acquisition de données sur ordinateur a été mis au point. Enfin la chaîne de mesure a été vérifiée.

Puis des essais de cuisson de génoise dans le four-pilote instrumenté ont été réalisés pour une consigne de température et de vitesse d'air fixée. Enfin, l'influence de l'augmentation de la température sur les paramètres enregistrés et sur les caractéristiques finales du produit est le sujet de la dernière partie.



## **1. ETAT DE L'ART**

**Tableau 1 - Classification des fours de boulangerie et pâtisserie (d'après Guinet, 1992)**

Chauffage direct	Sole fixe	Four maçonné	Bois	<i>Contact</i>
		Four métallique	Electricité	<i>Rayonnement</i>
	Sole mobile	Tunnel à tapis	Gaz - électricité	<i>Convection</i>
		Chariot		<i>Rayonnement</i>
Chauffage indirect	Sole fixe	Four métallique	Fioul - gaz	<i>Contact</i> <i>Rayonnement</i>
	Sole mobile	Sole tournante	Bois	<i>Contact</i> <i>Rayonnement</i>
		Balancelle Tunnel à tapis Chariot	Fioul – gaz	<i>Contact</i> <i>Rayonnement</i>

## 1.1 Instrumentation des fours de cuisson

### 1.1.1 Les fours

Les fours industriels sont traditionnellement classés en deux catégories :

- Les fours à chauffage direct dans lesquels la source de chaleur et les produits à cuire sont situés dans la même enceinte.
- Les fours à chauffage indirect dans lesquels la source de chaleur réchauffe un fluide intermédiaire (vapeur d'eau ou air) qui transmet dans un deuxième lieu la chaleur au produit à cuire.

Dans chacune de ces catégories, on peut ensuite distinguer différents types de fours (Tableau 1) avec comme paramètres :

- la sole est fixe ou mobile;
- le chauffage s'effectue par combustion ou par effet Joule,
- le mode de transfert de chaleur.

Enfin, selon que le produit circule ou pas dans la chambre de cuisson, les fours peuvent être classés en four continu ou discontinu.

Plusieurs études théoriques et expérimentales ont été élaborées pour caractériser la cuisson des produits céréaliers dans des fours continus ou discontinus, à l'échelle industrielle ou pilote et aussi des fours pilotes à l'échelle laboratoire.

#### 1.1.1.1 Les fours tunnels

L'utilisation des fours tunnels est plus répandue pour la cuisson des produits céréaliers grâce à la grande capacité de production et la minimisation de la consommation d'énergie qu'ils offrent. Ils sont de longueur variable (de 15 à 100 m) pour une largeur généralement comprise entre 0,80 m et 1,20 m. La pâte est disposée dans un moule (génévoise, pain, gâteau) ou directement (biscuit, pain) sur un tapis métallique traversant la chambre de cuisson. Généralement, cette dernière est divisée en plusieurs zones, de manière à imposer les profils thermique et hygrométrique voulus tout en limitant les échanges entre ces zones. La production maximum d'un four est définie par sa longueur et le temps de cuisson nécessaire pour atteindre la texture, la couleur et la teneur en eau désirée (Tayeb, 1994).

Deux fours continus (électrique et à gaz) à bande, à plusieurs compartiments, ont été utilisés pour évaluer le profil de température interne du produit ainsi que la température et l'humidité de l'air et les températures des parois du four (Baik *et al*, 2000 a, b). Ces paramètres ont été mesurés dans chaque zone du four en fonction de la température de consigne de chauffage de l'air. Pour cette étude, quatre types de gâteaux contenant de la levure ont été testés. Différentes propriétés ont été suivies : la teneur en eau, la masse volumique, le pH, la température, la couleur, la texture et la forme finale du produit ; et l'uniformité par rapport à la position, au centre et sur le côté de la bande. Les mesures ont été faites sur la pâte et sur les produits finaux, et sur des échantillons prélevés le long du four (regards) pour mesurer le pH, la teneur en eau et la couleur. La viscosité de la pâte a été étudiée en fonction de la température (hors four). Dans ce genre de fours continus, les mesures faites sur les produits dépendent des échantillons prélevés, fonction du type de four.

Un four continu a été utilisé à l'échelle semi-industrielle pour étudier la modélisation de la cuisson des biscuits. Ce four à chauffage indirect au gaz, (longueur 15m ; largeur 0,65m ; 160kg/h) a été instrumenté pour étudier les paramètres procédé et produit pendant la cuisson des biscuits, en continu, en faisant varier la température l'air et la vitesse de l'air dans les différentes zones du four (Savoye *et al*, 1992 ; Fahloul *et al*, 1994).

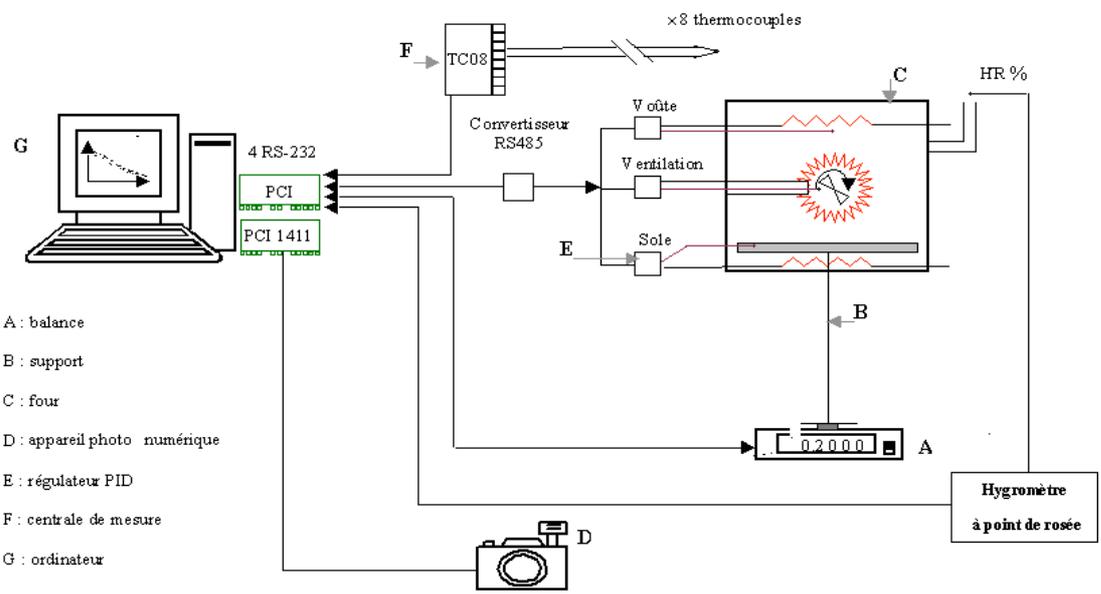


Figure 1 : Four ménager instrumenté pour la cuisson de produits céréaliers (Sommier et Douiri, 2006).

L'humidité de l'air a été mesurée dans plusieurs zones du four. Une sonde se déplaçant avec le tapis a été utilisée pour mesurer tous les 6 s la température de l'air du four et la température d'un biscuit. Pour mesurer la perte de masse, la teneur en eau, la couleur et l'épaisseur du biscuit pendant la cuisson, il a été nécessaire de faire des prélèvements tout au long du four (sept échantillons). Les propriétés physiques ont été obtenues à partir de la littérature et sont supposées constantes. Le modèle a permis de prédire la température et la teneur en eau de l'air, et le séchage du biscuit durant la cuisson.

#### 1.1.1.2 Les fours discontinus

Les fours discontinus sont utilisés pour des petites productions et pour la cuisson de produits spécifiques à l'échelle industrielle, ou artisanale.

Ils sont largement utilisés en recherche parce que plus faciles à instrumenter. Ils permettent, en utilisant une moindre quantité de produit, de suivre et recueillir un plus grand nombre d'informations sur le produit et le four pendant la cuisson. La variabilité des conditions de cuisson rencontrées (circulation ou non de l'air, nature et forme du moule, température et temps de cuisson ...) offre une grande diversité d'informations sur la cuisson de produits céréaliers.

Un four conventionnel électrique convectif (115 l de volume utile) réalisé pour la cuisson de pain français, a été instrumenté de façon à maîtriser les conditions opératoires et mesurer les variables entrant en jeu dans la modification de la pâte à pain au cours de la cuisson (températures et pression internes, perte de masse, gonflement, humidité de l'air) (Sommier *et al*, 2005). Les conditions opératoires (températures de la sole et de la voûte, quantité de vapeur d'eau injectée) ont été étudiées pour déterminer les paramètres de cuisson optimale permettant d'avoir un pain proche d'une référence fixée (couleur de la croûte, ouverture de la grigne, gonflement, structure de la mie).

Sommier et Douiri (2006) ont instrumenté un four domestique (Figure 1) pour comprendre les phénomènes qui gouvernent la cuisson du pain français en se rapprochant des conditions de cuisson traditionnelle. Ils ont mis en évidence le lien entre le développement du pain, la pression et les températures internes, la teneur en eau de l'air à la sortie du four et la perte de masse par des mesures en continu pendant la cuisson. Ce four domestique ainsi instrumenté est devenu un outil expérimental utile pour le suivi des cuissons d'autres produits céréaliers (génévoises, pizza, croissants...).

Sato *et al* (1987) ont utilisé un four électrique à convection forcée pour évaluer sa performance de cuisson en fonction du coefficient apparent de transfert de chaleur mesuré à différentes températures et vitesses d'air. La circulation de l'air dans l'enceinte de cuisson se fait parallèlement au produit (génévoise) déposé dans un moule en aluminium non isolé, au centre du four sur des briques poreuses. Le chauffage se fait jusqu'à ce que la température interne de la génévoise atteigne 90°C, puis prolongé de 5 min. Ils ont montré que le temps de cuisson peut être corrélé avec la vitesse et la température de l'air du four, qui ont une grande influence sur les propriétés du produit final (couleur, texture, volume, forme).

La cuisson de génévoise a été étudiée dans un four électrique sans circulation d'air, en moule cylindrique ( $\varnothing$  180, h 150 mm) avec des parois totalement isolées (Lostie *et al* 2002). Le chauffage du produit réalisé par sa surface libre correspond à un long temps de cuisson (4h à 200°C). L'instrumentation mise en place a permis le suivi de la masse, de la température de surface (pyromètre optique) et de la température interne du produit (3 positions). Des mesures de teneur en eau, d'activité d'eau et distribution de taille de pores sont réalisées sur des

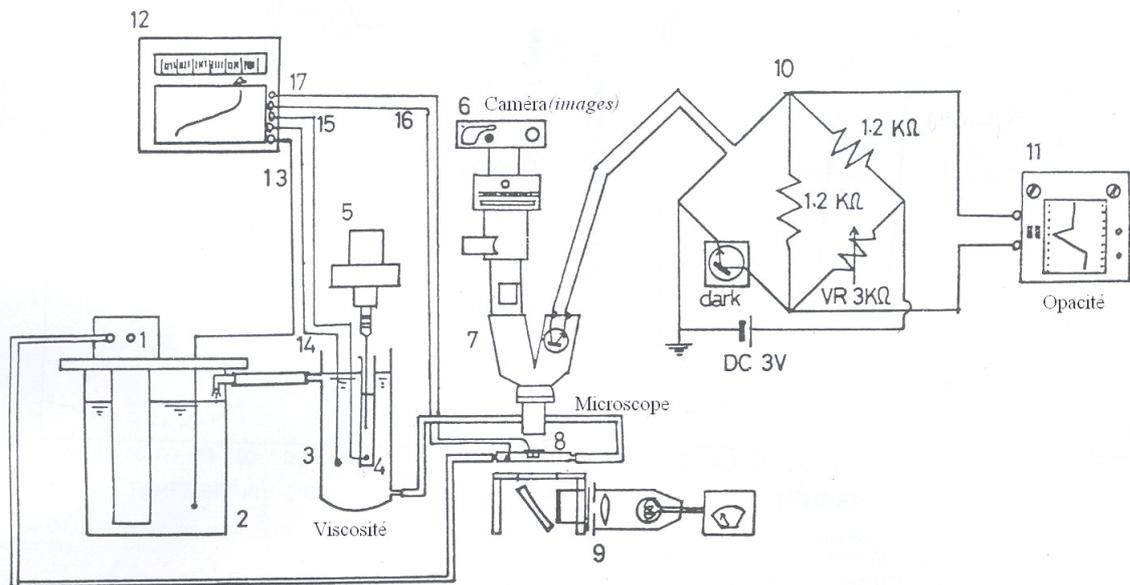


Figure 2 : Four pilote modèle (Mizukoshi *et al*, 1979).

(1 : bain de circulation d'eau ; 2 : réservoir ; 3 : bain thermostaté pour la mesure de la viscosité ; 4 : cylindre gradué ; 5 : viscosimètre type B ; 6 : caméra ; 7 : microscope ; 8 : support chauffant ; 9 : lampe ; 10 : circuit du phototransistor ; 11 : enregistreur ; 12 : enregistreur de température ; 13-17 : thermocouples).

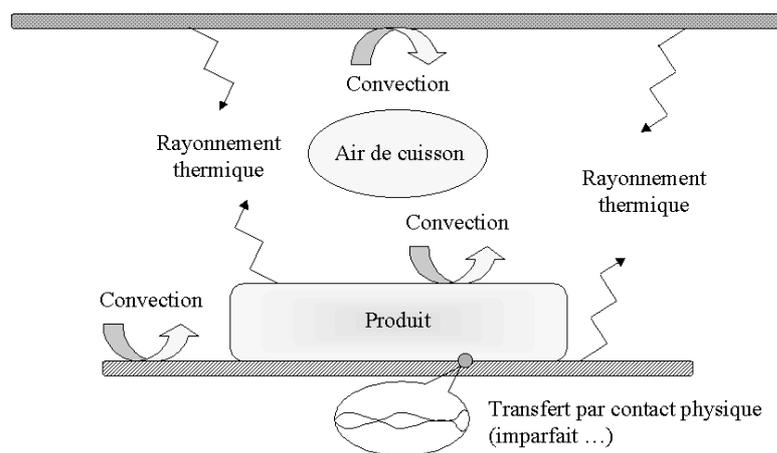


Figure 3 : Les différents type de transferts de chaleur (Sommier *et al*, 2002).

échantillons (mie, croûte) prélevés à différents temps de cuisson. Le gonflement est suivi par une camera.

### 1.1.1.3 Cuissons à l'échelle laboratoire

Des cuissons sont aussi réalisées à l'échelle laboratoire, expériences difficilement réalisables dans des fours classiques. Ainsi des micro-cuissons sont suivies en plaçant un film de pâte de génoise entre deux lamelles en verre déposées sur un support chauffant, en utilisant un microscope et une caméra.

Mizukoshi *et al* (1979) utilisent ce dispositif pour observer la gélatinisation de l'amidon et la coagulation des protéines d'œufs dans une pâte de génoise (Figure 2). Des mesures simultanées à l'aide d'un viscosimètre et d'un microscope, tous les deux maintenus à la même température (thermostatés) ont permis de suivre en continu les cuissons à différentes températures : évolution de la transmission de lumière, photos de transformation de la pâte, viscosité.

Bell *et al* (1975) ont utilisé cette technique pour suivre le mouvement et l'expansion des bulles de gaz pendant la cuisson de génoise (avec matière grasse), et de différentes formules de gâteaux. Deux types de camera permettent de filmer et d'avoir un enregistrement vidéo, permettant de suivre l'évolution du produit.

Voisey *et al* (1979) ont élaboré un four pilote pour suivre le développement de la structure de différentes formules de gâteaux pendant la cuisson à 175°C dans un moule en aluminium. Des mesures de températures internes, de température d'air et de hauteur ont été élaborées en parallèle avec les mesures de forces de cohésion. Des mesures de perte de masse ont été faites pendant des essais séparés.

### 1.1.2 Les différents modes de transfert de chaleur

Les principaux modes de transfert de chaleur utilisés dans une chambre de cuisson sont les transferts par contact, par convection et par rayonnement (Figure 3). La proportion de chaque mode de transfert est fonction du type du four choisi selon la nature du produit à cuire.

#### *Le transfert par contact*

Le transfert de chaleur par contact se produit entre le produit et des surfaces à son contact (fond et parois du moule, tapis du four, sole...). Au cours de la cuisson, la quantité de chaleur transmise au produit par contact dépend de la température de la surface  $T_{\text{support}}$  et de son évolution ; de la température du produit  $T_{\text{produit}}$  ; de l'étendue de la surface de contact  $A$  ; de la « qualité » du contact (nature de la surface, efficacité) traduite par le coefficient de transfert de chaleur  $h_{\text{contact}}$ .

Le flux de chaleur échangé  $\Phi_{\text{contact}}$  (W) s'exprime par :

$$\Phi_{\text{contact}} = h_{\text{contact}} \cdot A \cdot (T_{\text{support}} - T_{\text{produit}})$$

avec  $h_{\text{contact}}$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) ;  $T_{\text{support}}$  et  $T_{\text{produit}}$  (K),  $A$  ( $\text{m}^2$ )

Dans les cas où la pâte est déposée sur une bande ou sole, le contact physique entre le produit et son support est souvent imparfait à cause de la présence d'une fine lame d'air à l'interface. L'air de faible conductivité thermique ralentit l'échange de chaleur (Sommier *et al*, 2002).

#### *Le transfert par convection*

Le transfert de chaleur par convection se produit entre un fluide en mouvement (gaz ou liquide) et un corps solide. C'est le principal mode de transfert rencontré dans les fours à air chaud où l'air, chauffé par une source chaude, transmet la chaleur au produit.

Le flux convectif ainsi échangé ( $\Phi_c$ ) est estimé par l'expression suivante :

$$\Phi_c = h_c \cdot A \cdot (T_{\text{fluide}} - T_s)$$

Où  $h_c$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) est le coefficient de transfert convectif,  $T_{\text{fluide}}$  la température du fluide



caloporteur (K), A la surface du produit exposée à la convection (m<sup>2</sup>) et T<sub>s</sub> la température de cette surface (K).

Trois types d'échanges convectifs sont rencontrés :

- la convection forcée : lorsque le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure (pompe, ventilateur, etc.). Elle permet un renouvellement de l'air chaud au contact de la surface, facilitant l'évacuation des gaz émis (CO<sub>2</sub>, eau vapeur...). La conséquence peut être un chauffage important de la surface avec assèchement et coloration.
- la convection libre : lorsque le mouvement du fluide est exclusivement causé par des différences de masse volumique au sein du fluide suite à une différence de température. Moins efficace pour le transfert de chaleur, elle conduit à des temps de cuisson allongés. L'influence du rayonnement est souvent plus importante.
- la convection mixte : lorsqu'il y a couplage des deux premiers phénomènes (chauffage direct au gaz).

#### *Le transfert par rayonnement*

Le transfert de chaleur par rayonnement est un échange d'énergie électromagnétique entre un solide et le champ de rayonnement avec lequel il interagit. Une plage de longueurs d'ondes comprises entre 0,1 et 100 μm est associée au rayonnement thermique.

Le flux radiatif (Φ<sub>r</sub>) est estimé par l'expression suivante :

$$\Phi_r = F \cdot A \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_r^4 - T_s^4)$$

Où : F est le facteur de vue entre le produit et la surface rayonnante. Dans le cas d'un petit objet entouré d'une grande surface rayonnante, le facteur de vue est pris égal à l'unité.

A : la surface du produit exposée au rayonnement (m<sup>2</sup>),

σ : la constante de Stephan-Boltzman (5,67. 10<sup>-8</sup> W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>),

ε : l'émissivité de la surface du produit exposée au rayonnement,

T<sub>r</sub> : la température de la surface rayonnante (K),

T<sub>s</sub> : la température de surface du produit exposée au rayonnement (K).

### **1.1.3 Mesures des paramètres de cuisson**

#### **1.1.3.1 Vitesse de l'air**

Cette mesure est très importante dans l'estimation de l'efficacité du transfert entre l'air et le produit. La mesure en ligne est délicate : certains capteurs ne résistent pas aux hautes températures ; leur utilisation nécessite qu'ils soient exactement positionnés face au flux d'air. Savoye-Barbotteau (1993) utilise un capteur directionnel à moulinet Hontsch (Ø = 16,3 mm) pour mesurer les vitesses de l'air dans les cheminées d'évacuation de buées et aux extrémités du four tunnel. Ce type de capteur fournit une mesure avec une précision au maximum de 0,15 m/s pour les vitesses de 1 à 10 m/s. Cependant les conditions de mesures (position de l'axe du moulinet, encrassement, angle d'incidence du flux avec l'axe du moulinet) conduisent à une incertitude de lecture pouvant atteindre 0,3 m/s. Ils résistent jusqu'à une température de 400°C, contrairement aux capteurs à fil chaud. Ceux-ci permettent des mesures à faible vitesse (0-10m/s) mais pour des températures inférieures à 170°C. Therdthai (2003) a développé un capteur autonome à fil chaud (NiCr, associé avec un thermocouple) se déplaçant dans un four tunnel pendant la cuisson de pain, résistant à 250°C (0 m/s).



### 1.1.3.2 Température de l'air

Les fours industriels sont généralement équipés de thermocouples afin de mesurer la température de l'air au milieu du four. Ils sont généralement positionnés à proche distance des surfaces supérieure et inférieure du tapis, ce qui dans le cas d'un fort rayonnement, peut biaiser la mesure (Broyart et Trystram, 2000). Dans les fours discontinus, température de l'air est mesurée en fixant un thermocouple dans l'ambiance du four pas loin de l'emplacement du produit (Garisson et Peart, 1986, Sato *et al*, 1987).

Savoie-Barbotteau (1993) a établi le profil thermique d'un four tunnel en utilisant un enregistreur de température. Cet appareil enregistre les températures transmises par 6 thermocouples disposés sur un cadre métallique de façon à obtenir une cartographie thermique de la section de la chambre de cuisson. En sortie du four, les enregistrements sont transférés sur ordinateur et analysés. Ceci permet de mettre en évidence les effets de bords.

### 1.1.3.3 Humidité de l'air

La mesure de l'hygrométrie de l'air reste difficile à réaliser dans les conditions de cuisson à haute température. Ce problème est résolu en analysant l'air du four après son extraction et son refroidissement contrôlé dans une gaine thermostatée pour éviter les phénomènes de condensation (Broyart et Trystram, 2000). Dans le cas des fours tunnels, la mesure de l'humidité de l'air se fait par aspiration de l'air à travers des orifices tout au long du four. La mesure se fait soit :

- à partir de la température de rosée de l'air aspiré (principe du miroir refroidi). Ensuite par un programme de calcul, l'humidité absolue est déterminée (Baik *et al* 1999).
- par une mesure psychrométrique. L'air aspiré de la chambre de cuisson (150°C, 200°C, 250°C) est insufflé à la surface d'une coupelle remplie d'eau, suivant le principe de l'hygromètre à jet d'impact (Savoie-Barbotteau, 1993). L'humidité de l'air est retrouvée par la mesure des températures sèches et humides de l'air

Dans les fours discontinus, la mesure est faite en continu de la même façon (Sommier et Douiri, 2006 ; Baik et Marcotte, 2002).

L'emplacement judicieux du capteur reste à déterminer surtout pour les procédés continus. Sommier *et al* (2005) ont mesuré l'humidité de l'air à haute température en quantifiant la variation du taux d'oxygène présent dans l'ambiance du four par comparaison à un air de référence. Le dispositif a été calibré dans le four en utilisant un hygromètre.

### 1.1.3.4 Flux de chaleur et coefficients de transfert de chaleur

Le flux de chaleur est défini comme la quantité de chaleur par unité de surface de produit transmise par seconde, du « four » vers le produit (Therdthai et Zhou, 2003). La mesure du flux de chaleur (conduction, convection, radiation) apporte des informations complémentaires à la mesure des températures de l'air, pour contrôler la qualité de produits céréaliers (Fahloul *et al*, 1995 ; Sato *et al*, 1987).

A l'aide de fours bien instrumentés, Pierrel et Newborough (2003) proposent d'établir des cartes de flux de chaleur permettant d'identifier des « zones de cuisson adaptées » (baking confort zone), en relation avec les modes de chauffage et les réponses des produits en termes de couleur, volume, structure, teneur en eau.

Les différentes variations de volume, forme, couleur et de structure sont étroitement liées au flux de chaleur reçu à travers la surface du produit, la paroi du moule ou le support/tapis sur lequel il est posé. Les différents flux (conduction, convection, radiation et parfois condensation) sont évalués soit par mesure directe ou par estimation afin de pouvoir déterminer les coefficients de transfert utilisés pour modéliser la cuisson et estimer la consommation d'énergie.

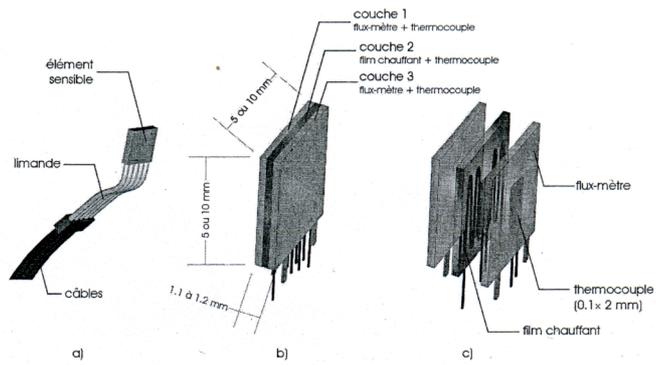


Figure 4 : Capteur pour la mesure de h : (a) vue générale, (b) et (c) détail de l'élément sensible.

Pour calculer les profils de température et d'humidité dans la pâte, des études réalisées sur les biscuits ou le pain ont utilisé un coefficient de transfert de chaleur constant pendant la cuisson, en prenant des valeurs de la littérature (Savoie *et al*, 1992 ; Fahloul *et al*, 1994). Li et Walker (1996) ont estimé le coefficient de transfert de chaleur convectif dans trois types de fours tunnels (conventionnel, à impact et hybride) pendant la cuisson de gâteaux en utilisant un capteur de coefficient de transfert «h-monitor» circulant dans le four. Le coefficient de transfert est déterminé à partir des caractéristiques du capteur (masse, dimensions, Cp du matériau constituant les faces réceptrices) et des mesures de températures enregistrées en fonction du temps. Baik *et al* (1999) utilisent ce capteur pour la détermination de flux total de chaleur (convectif + radiatif) capté par la surface pendant la cuisson de deux types de gâteaux dans un four tunnel industriel électrique à plusieurs compartiments. Le flux total enregistré à la surface du capteur est considéré comme la somme des flux convectifs à partir de l'air chaud, des flux radiatifs échangés avec la paroi interne du four et les flux radiatifs échangés avec les résistances électriques. Chacun de ces flux est fonction de la température de l'air, de la température de surface du capteur ainsi que du coefficient de transfert correspondant. Les trois coefficients de transfert se retrouvent dans le coefficient de transfert global déterminé par le h-monitor.

Pour la cuisson de génoise dans un moule placé dans un four électrique à convection forcée, Sato *et al* (1987) déterminent expérimentalement le coefficient de transfert de chaleur global (apparent h). Ils utilisent les courbes temps - température enregistrées par un cylindre en aluminium (Ø 66 mm, h 50 mm) peint en noir (résine en silicone  $\epsilon \approx 1$ ). Connaissant les propriétés du cylindre (Cp, masse, surface) et la température de l'air, le coefficient de transfert global est calculé. Ce coefficient est fonction des paramètres de cuisson (température et vitesse d'air). Une équation est proposée pour déterminer une valeur h en fonction de la température de l'air. En considérant un petit objet entouré d'une grande surface rayonnante, ils ont pu déterminer le coefficient de transfert radiatif ( $h_r$ ) grâce à l'expression suivante :

$$h_r = \sigma \cdot \epsilon \cdot (T' + T_r)(T'^2 + T_r^2)$$

où  $\sigma$  est la constante de Stephan-Bolzman ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) ;  $\epsilon$  l'émissivité de la surface du cylindre ;  $T'$  la température de surface du cylindre supposée égale à la température interne mesurée (conductivité élevée du matériau) ;  $T_g$  la température des surfaces rayonnantes supposée égale dans le cas du four à convection forcée, à la température de l'air (absence de source de chaleur et parois chauffées par l'air chaud).

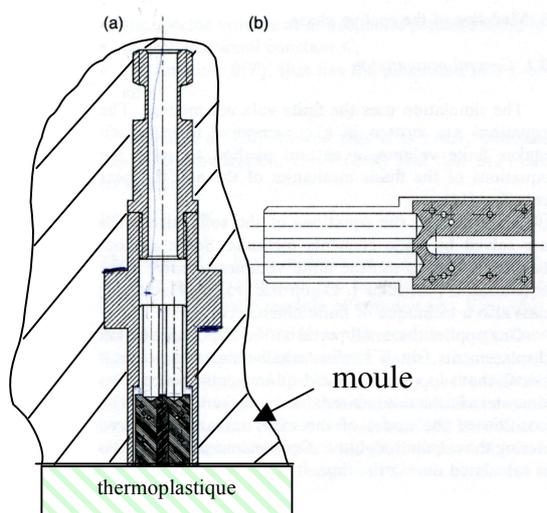
Connaissant ces deux coefficients de transfert de chaleur (h et  $h_r$ ), ils ont calculé le coefficient de transfert convectif ( $h_c = h - h_r$ ). Ils ont montré que ce coefficient est indépendant de la température de l'air (entre 180°C et 220°C) mais très sensible à la variation de la vitesse de l'air (9 à 18 kcal/m<sup>2</sup>.h.°C entre 0,5 et 1,5 m/s).

Des mesures de flux de chaleur similaires à la méthode précédente, utilisant deux cylindres en cuivre (chromé brillant et noirci) ont été utilisés pour étudier l'effet des modes de transfert de chaleur radiatifs et convectifs sur le développement de la couleur de gâteaux (Shibukawa *et al*, 1989) ; et pour la compréhension des phénomènes thermiques et l'optimisation du procédé de cuisson utilisant la vapeur d'eau surchauffée (Duquenoy et Desage, 2000).

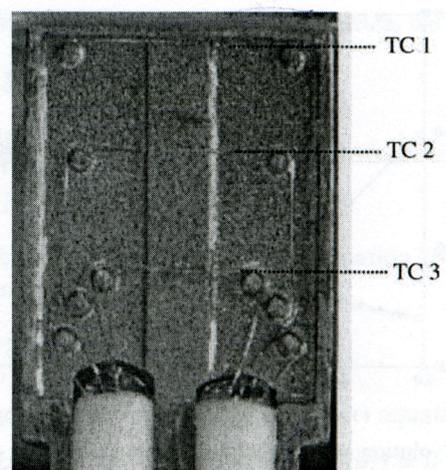
Vitrac et Trystram (2005) ont étudié la variation du coefficient d'échange de chaleur pendant la friture à la surface d'un milieu poreux à l'aide d'un capteur spécifique (Captec, Fr.) (Figure 4). Ce capteur (5 x 5 x 1,1 mm) est muni d'une limande supportant 12 fils d'alimentation et de mesures. L'élément sensible est constitué de deux microfluxmètres (sensibilité  $1 \mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) collés de part et d'autre du film chauffant de manière à générer un flux de chaleur connu et symétrique. Chacune des trois couches ainsi constituées comporte un thermocouple planaire 2 x 0,1 mm de type K intercalé sous une pellicule de cuivre de 0,3 mm. Le coefficient de transfert a été obtenu à partir d'un bilan enthalpique à l'échelle du capteur en réponse à un échauffement périodique de puissance connue.

**Tableau 2 - Systèmes colloïdaux des pâtes et gâteaux (d'après Mizukoshi, 1990)**

Système	Pâte	Gâteau
Phase dispersée	Bulles Farine (amidon, protéine) Jaune d'œuf Huile et matière grasse	Cellules gazeuses
Phase continue	Eau Blanc d'œuf Sucre	Amidon gélatinisé Protéines coagulées Alvéoles
Terminologie des colloïdes	Mousse Emulsion Emulsion solide	Mousse solide
Structure	Solution	Solide alvéolaire



**Figure 5 : Schéma technique du capteur de flux et du capteur de surface du moule : (a) vue en coupe du capteur contenant la cellule de mesure cylindrique. (b) vue d'une moitié du cylindre constituant la cellule de mesure (vue détaillée sur la Figure 6) .**



**Figure 6 : Image du capteur montrant les fils de thermocouples implantés selon les isothermes.**

Massé et al. (2004) ont mesuré le flux de chaleur à l'interface polymère – moule pendant l'opération de moulage par injection de thermoplastique pour déterminer la résistance de contact. Le capteur de flux utilisé (Figure 5) est composé d'une cellule cylindrique de mesure (b) contenu dans un corps (a). La cellule est composée de deux demi cylindres dont les plans de coupes sont perpendiculaires à la surface de la cavité de moulage pour éviter de modifier les flux. Trois thermocouples de 12  $\mu\text{m}$  de diamètres sont placés au niveau des isothermes parallèlement à la surface (Figure 6). La jonction de chacun des thermocouples est soudée au corps du capteur. La position des thermocouples par rapport à la surface du moule est fixée selon les règles de la méthode inverse utilisée pour exploiter les mesures. La première consiste à placer un thermocouple assez loin de la surface (5 mm) dans la zone où le transfert est unidirectionnel et qui servira de condition aux limites. Un deuxième thermocouple est proche de la surface du moule à 200  $\mu\text{m}$ . Un troisième thermocouple intermédiaire est placé à une distance de 2 mm de la surface. Il servira à vérifier la concordance entre la valeur donnée par le modèle inverse et la valeur réellement mesurée. Les fils des thermocouples sont placés dans une boîte de référence où est placée une sonde en platine. Une tension amplifiée est enregistrée par un système d'acquisition à une fréquence de 1ms. Une méthode classique séquentielle est utilisée pour déterminer le flux de surface ainsi que la température.

### **1.1.3.5 Durée de cuisson**

Les cinétiques des réactions de gélatinisation de l'amidon, de coagulation des protéines et de coloration ne sont pas uniquement fonction de la température mais aussi du temps de cuisson. Ainsi, la réduction du temps de cuisson par l'augmentation de la vitesse ou la température de l'air, nécessite la vérification de l'état d'avancement de ces réactions pour éviter la dégradation de la qualité du produit fini. Il a été démontré dans le cas du pain, que même si ces réactions sont complètes, la qualité des produits cuits à des courts ou longs temps de cuisson est très différente. Cauvin et Young (2001, cité par Therdthai (2003)) ont constaté que la cuisson longue donne des pains moins tendres avec des cavités situées aux bords de la mie. D'autre part, MacFarlane (1983) signale que l'étape de gélatinisation doit être assurée dans un intervalle de température de 40°C à 90°C pendant un temps suffisant, faute de quoi la mie du produit final sera dense et inélastique. La couleur finale du produit et sa texture sont aussi liées au temps de cuisson (cf §suivant).

Skjodebrand et Andersson (1989) ont comparé la cuisson de pain par cuisson à infrarouge et par cuisson conventionnelle et montré que le procédé infrarouge réduit considérablement le temps de cuisson.

Le temps de cuisson est déterminé par la mesure au tachymètre de la vitesse de tapis dans le cas de four tunnels (Broyart et Trystram, 2000) ou par chronomètre dans le cas de la cuisson en four discontinu.

Dans tous les cas il faudrait définir à quoi correspond le temps de cuisson, en précisant le temps de chauffage (maîtrisé) et ce qui se passe pendant l'étape de refroidissement. Durant cette dernière période la « cuisson » du produit encore chaud à l'intérieur peut se prolonger.

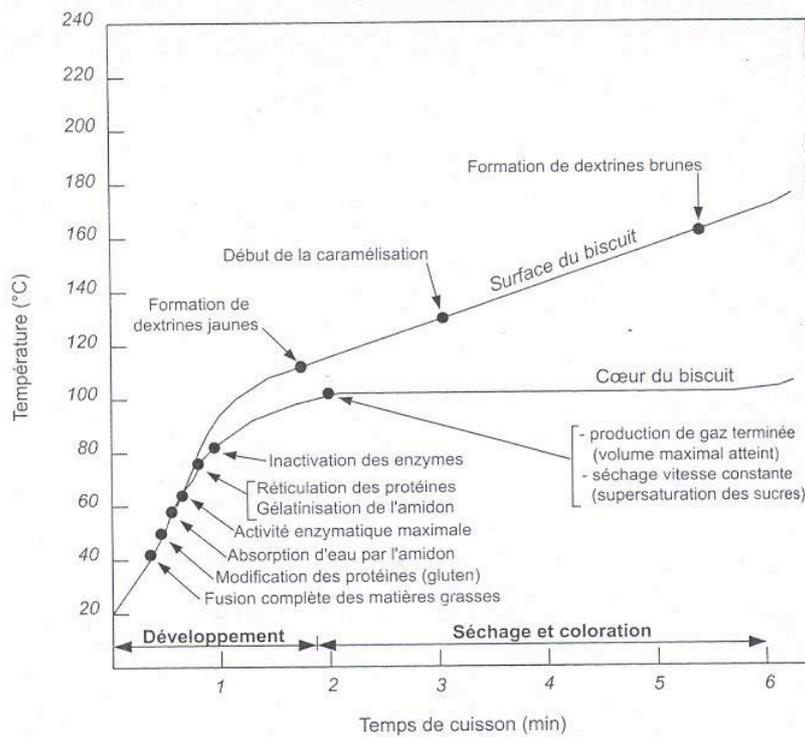
## **1.2 Cuisson des produits de type génoise**

### **1.2.1 Définition de la génoise**

Les génoises sont utilisées comme fonds pour entremets ou petits gâteaux à la pièce, base de certains petits-fours, ou entremets glacés : la génoise tient en pâtisserie industrielle la même place que le feuilletage, les pâtes levées ou la pâte à choux. Il existe deux types de génoises : celles avec des œufs, du sucre et de la farine ; et celle dans laquelle on ajoute de la graisse végétale ou du beurre (Kiger et Kiger, 1967).

**Tableau 3 - Température et temps de cuisson pour deux types de gâteau (Pylar, 1973)**

Gâteau	Temps (min)	Température (°C)
Quatre-quarts	50 à 65	149 - 168
Génoise	40 à 50	163 - 168



**Figure 7 : Processus de cuisson d'un biscuit. Distribution des phénomènes de cuisson dans le temps et l'espace (Manley, 2000)**

Les pâtes à génoise sont considérées comme des émulsions généralement définies comme un système dispersé hétérogène à plusieurs composants. La pâte est constituée de deux phases : une phase continue représentée par un mélange constitué par l'eau, les blancs d'œufs et le sucre ; une phase dispersée constituée par les bulles de gaz, les particules de farine, les jaunes d'œufs, et les matières grasses.

La phase continue de la génoise cuite est constituée d'amidon gélatinisé, de protéines coagulées et d'alvéoles de gaz. La phase dispersée est représentée par les bulles de gaz. Ainsi, les génoises peuvent être considérées comme des mousses solides (Tableau 2) (Mizukoshi, 1990).

### **1.2.2 Préparation et enfournement**

Après avoir pesé les ingrédients, ceux-ci sont mélangés selon un ordre permettant d'avoir un mélange uniforme et une pâte lisse et bien aérée. La phase de battage, étape très importante dans la fabrication de la génoise, va assurer l'hydratation des protéines et l'introduction d'air dans la pâte ce qui va déterminer le déroulement de la cuisson et la qualité du produit fini (texture, volume).

La pâte battue (fluide) est mise dans un moule et introduite rapidement dans le four. Dans le cas de pâte contenant des agents levants, ces derniers commencent à réagir dès qu'ils sont en solution en dégageant du dioxyde de carbone. Dans le cas de pâte dépourvue d'agent levant, les gaz représentent l'air introduit pendant l'étape de battage. Dans les deux cas, ces gaz tendent à remonter à la surface de la pâte. Les petites bulles peuvent coalescer quand elles rentrent en contact les unes avec les autres pour former de plus grandes bulles plus légères. L'échappement des gaz de la pâte se produit avec le grossissement de la structure des cellules de gaz quand l'enfournement est retardé.

### **1.2.3 La cuisson : température et temps de cuisson**

La température de l'air du four idéale pour la cuisson des gâteaux varie selon plusieurs facteurs, les plus importants étant la composition, et la teneur en eau de la pâte, la dimension du moule. Les pâtes riches en sucre nécessitent de faibles températures de cuisson (163° - 177°C), alors que celles contenant de moindres quantités peuvent être cuites à des températures plus élevées (177° - 204°C).

Le temps de cuisson doit être ajusté à la température de cuisson : plus la température de cuisson est élevée, plus court est le temps de cuisson et inversement. Il est essentiel que le temps de cuisson dans le four ait une durée minimum pratique, compatible avec une cuisson « parfaite » pour préserver au mieux l'humidité dans le gâteau.

Le Tableau 3 donne un exemple pour les temps et les températures de cuisson préconisés pour deux types de gâteaux cuits dans des conditions « normales » (454 g).

La fin de la phase de cuisson (critère d'arrêt) pour des biscuits, selon Wade (1988), est associée à deux propriétés du produit : sa couleur et sa teneur en eau. La couleur est le premier critère d'acceptation du consommateur et la teneur en eau contrôle la stabilité du produit pendant le stockage ainsi que l'éventuel développement de mauvais goût et texture.

### **1.2.4 Le refroidissement**

L'affaissement de la génoise est défini comme la différence entre le volume maximum calculé pendant la cuisson dans le four et le volume de la génoise après refroidissement. Mizukoshi *et al* (1979) expliquent que ce phénomène résulte d'un équilibre qui s'établit entre les forces de rétraction exercées quand la pression des bulles de gaz diminue pendant le refroidissement et la résistance exercée face à ces forces.

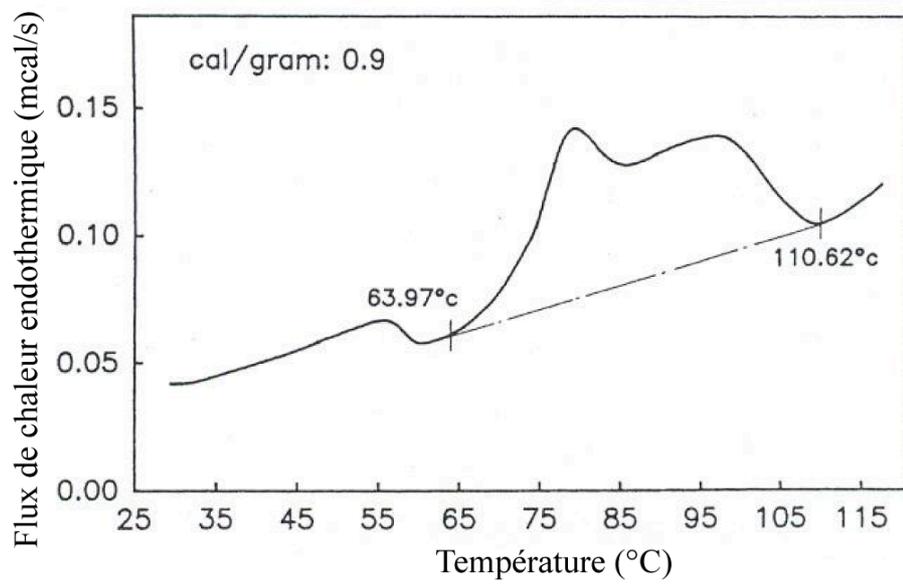


Figure 8 : Thermogramme d'une pâte à pain sans levure (He et Hosoney, 1991)

Cette résistance est quantifiée par la mesure du module de cisaillement de la mie entourant les bulles de gaz. Une équation de régression linéaire exprimant l'affaissement de la génoise en fonction du module de cisaillement a été établie.

Il semble que dans la littérature, la fin de cuisson corresponde à la fin du chauffage suivi par la sortie du produit du four. Les phénomènes susceptibles de se produire pendant cette phase (souvent non contrôlée) sont rarement commentés.

### **1.3 Modifications du produit pendant la cuisson**

#### **1.3.1 Réactions biochimiques intervenant pendant la cuisson**

La plupart des constituants de la pâte subissent des modifications sous l'action de la température (Figure 7) et de l'activité enzymatique.

Nous nous intéressons à la cuisson de pâte de génoise dont la préparation est dépourvue de matière grasse (ajoutée) et de poudres levantes, et affectant principalement l'amidon et les protéines.

##### *Gélatinisation de l'amidon*

L'amidon représente entre 80 et 84% de la farine de blé type 55 par rapport à la matière sèche. L'amidon au microscope optique se présente sous forme de granules de dimension variant de 2-5 à 30-40  $\mu\text{m}$ . Cette apparence granulaire est due à l'organisation spatiale de longues chaînes glucidiques, appelées chaînes d'amidon. Une chaîne d'amidon peut être linéaire (amylose) ou ramifiée (amylopectine) de 1000 à 5000 unités glucose.

Dans le granule, les chaînes d'amylose sont associées de manière régulière sous forme cristalline, diminuant ainsi leur affinité pour l'eau. Dans le cas de l'amylopectine, les zones ramifiées sont amorphes (non cristallines) et accessibles à l'eau et aux enzymes, les zones linéaires sont sous forme cristalline.

Roussel *et al* (2002) décrivent le phénomène de gélatinisation de l'amidon. Ils expliquent que l'élévation de la température de la suspension (pâte) entraîne l'augmentation de l'agitation des molécules provoquant la perte de cristallinité des chaînes linéaires d'amylose et des zones cristallines de l'amylopectine. L'eau est alors absorbée par le granule d'amidon qui se gonfle et éclate laissant s'échapper les chaînes d'amylose hors du granule. Il en résulte une augmentation de volume, une diminution de la mobilité des granules et une diminution de l'eau libre : la viscosité du milieu augmente. L'amidon subit ensuite une hydrolyse sous l'action des amylases : l'amylolyse. Leur action consiste à attaquer l'amylopectine et les chaînes d'amyloses pour donner des unités moléculaires plus petites (dextrines, maltose). Le milieu devient moins visqueux.

La gélatinisation a un rôle dans l'établissement de la texture des produits cuits : texture friable pour les biscuits secs peu hydratés, texture moelleuse pour les produits de boulangerie-pâtisserie.

Selon Marston et Wannan (1976) et He et Hosney (1991), la gélatinisation de l'amidon commence à une température voisine de 60°C (Figure 8) et s'accélère à 70°C. Les  $\alpha$ -amylases, responsables de l'amylolyse, atteignent une activité maximale entre 60 et 70°C. Elles sont inactivées entre 80 et 85°C. La gélatinisation de l'amidon est plus ou moins retardée selon la constitution de la pâte (essentiellement teneur en eau). En effet, les sucres et les sels à grande affinité pour l'eau, ainsi que la matière grasse enrobant l'amidon interviennent pour décaler vers des valeurs plus hautes la température de début de gélatinisation et celle où la gélatinisation est maximale (Roussel *et al*, 2002). Les autres constituants du blé tels que les protéines, n'ont pas d'effet sur la température du début de gélatinisation de l'amidon de blé (Mizukoshi *et al*, 1979).

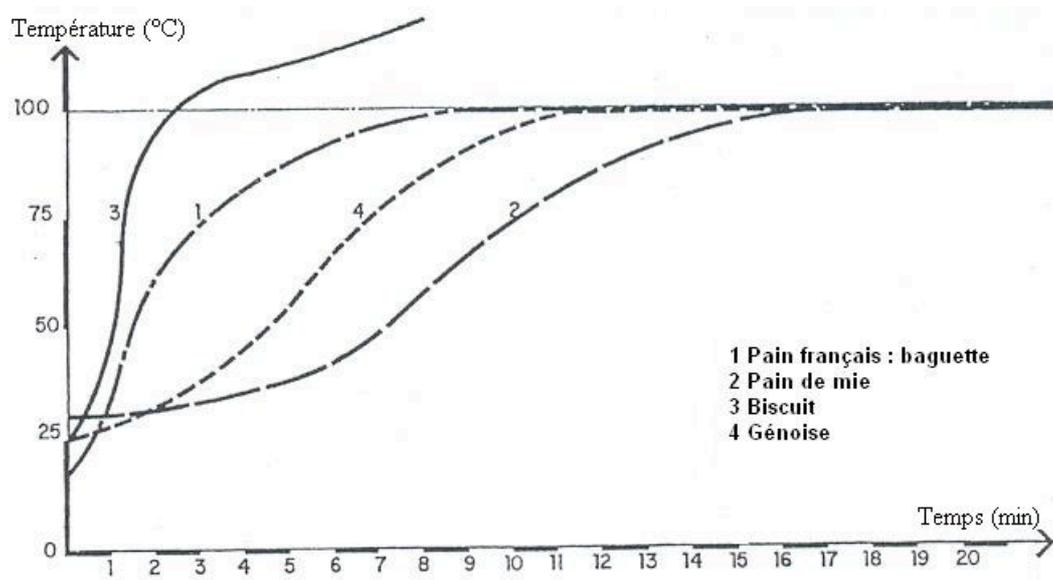


Figure 9 : Profil de température interne pendant la cuisson de différents produits céréaliers (Audidier, 1968)

Mizukoshi *et al* (1979) ont étudié la gélatinisation de l'amidon d'une pâte de génoise dans un système de cuisson à l'échelle laboratoire. Pour ce faire, ils ont mesuré la transmission de la lumière par la pâte pendant la cuisson sous une lumière polarisée à l'aide d'un phototransistor relié à l'installation. La perte de biréfringence a été attribuée à la gélatinisation de l'amidon. Elle débute à 79°C et est complète à 90°C.

Zanoni *et al* (1995) ont utilisé les cinétiques de gélatinisation (DSC) pour modéliser la cuisson de pain, à partir d'échantillons de croûte et mie pris pendant la cuisson entre 60 et 98°C. La gélatinisation totale est considérée comme un indice de cuisson minimale.

#### *Dénaturation des protéines*

Dans une pâte hydratée, les protéines et en particulier le gluten, en absorbant l'eau, voient leur propriétés rhéologiques modifiées. Ils forment ainsi une structure fondamentale de la pâte capable de retenir les gaz sous une certaine pression. Au dessus de 75°C, les protéines coagulent, perdent toute élasticité et deviennent rigides. Cette dénaturation irréversible provoque la libération de l'eau qui sera disponible pour le gonflement des granules d'amidon (Marston et Wannan, 1976).

### **1.3.2 Transfert de chaleur et de matière dans le produit**

On distingue deux types de profil thermique en fonction de la localisation dans le produit, à l'intérieur ou en surface.

#### *Profil internes*

Les profils thermiques internes varient selon le type de produit (pain, génoise, biscuit, Figure 9) et la position du point de mesure. Cependant, la taille d'un produit limite le nombre de mesures possibles en particulier pour des biscuits fins (2 à 3 mm). Dans ce cas, un seul thermocouple est inséré dans le produit pour suivre sa température (Savoie-Barbotteau, 1993, Chevallier *et al*, 2002).

Pour les produits de grandes dimensions, des peignes de thermocouples ont été élaborés pour enregistrer le profil de températures internes à des positions fixes dans le produit. Dans le cas des produits cuits en moule, Hasatani *et al* (1992) ont mesuré les températures internes en 11 points différents dans le pain : 4 thermocouples dans le plan médian horizontal espacés de 15 mm depuis le centre, et 7 thermocouples placés sur l'axe vertical espacés de 24 mm.

Lostie *et al* (2002) et Sommier *et al* (2002) ont utilisé des moules isolés latéralement pour la cuisson de génoise, les plans horizontaux étant ainsi supposés isothermes. Lostie *et al* (2002) utilisent 3 thermocouples placés dans l'axe central, espacés de 1 cm à partir du fond (sur tiges horizontales traversant le moule (moule  $\varnothing = 180$  mm, h = 150 mm). Sommier *et al* (2002) ont utilisé un peigne de 7 thermocouples (120  $\mu$ m de diamètre) insérés dans des tubes de maintien en inox ( $\varnothing_{int} = 0,8$  mm). Les mesures sont aussi dans l'axe du moule, espacés de 3 mm. Le même dispositif avec 3 thermocouples a été utilisé pour la cuisson du pain français (sans moule) (Sommier *et al*, 2005). Malgré la faible dimension des thermocouples, les tubes de maintien ( $\varnothing_{ext} = 1$ mm) traversant les plans verticaux peuvent favoriser la création de canaux dans le produit, pouvant par la conduction de chaleur légèrement perturber la mesure de température.

#### *Surface du produit*

La température de surface a été mesurée dans le cas de la cuisson du pain en four conventionnel avec un thermocouple fin (0,01 mm, Skjodebrand et Andersson, 1989, ou 0,5 mm, Zanoni *et al*, 1995b) pour des cylindres de pain respectivement de 5 à 10 mm, et de 54,4 mm d'épaisseur initiale.

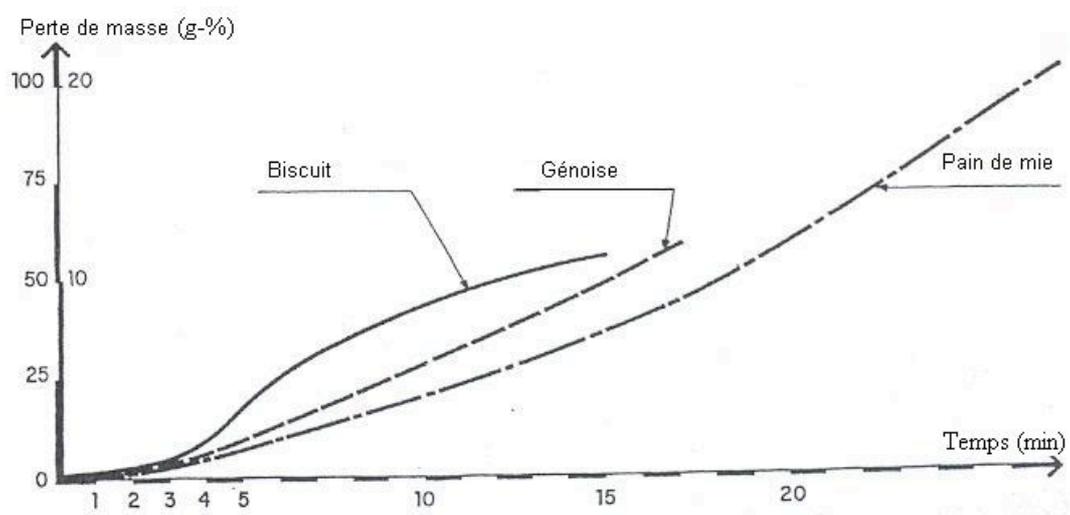


Figure 10 : Perte de masse pendant la cuisson de différents produits céréaliers (Audidier, 1968)

Pour s'assurer de l'endroit de la mesure à la surface du pain, Sommier et Douiri (2006) ont fixé un thermocouple à 5 cm de la sole ce qui équivaut à environ 1 cm au-dessus du pàton. Au cours du gonflement, le thermocouple s'enfonce dans le produit et mesure une température supérieure à celle mesurée au sein de la pâte et assimilée à la température de surface. La reproductibilité de ces mesures est difficile (installation des thermocouples), la quantité de pâte au-dessus du thermocouple n'est pas maîtrisée. Il existe un risque pour que le thermocouple mesure la température de l'air et non celle de la surface du produit.

La température de surface est aussi mesurée à l'aide d'un thermomètre infrarouge en continu pendant la cuisson de génoise ou de pain (Lostie *et al*, 2002, Zanoni *et al*, 1995b) ou en dehors du four par échantillonnage à différents temps de cuisson de biscuits (Shibukawa 1989). La mesure en continu nécessite la fixation du capteur en dehors du four au-dessus de la surface du produit, en le plaçant derrière une fenêtre en un matériau laissant passer le rayonnement infrarouge. Lostie *et al* (2002) ont utilisé un hublot (SeZn). Zanoni *et al* (1995b) ont choisi une solution plus économique, en installant un hublot percé d'un trou à 33 cm de la surface du produit, ce qui correspond à un diamètre de spot de 24 mm tout en refroidissant la tête de mesure (système de refroidissement à eau).

Pour fixer l'émissivité du produit, Lostie *et al* (2002) ont noirci la surface et l'ont supposée égale à l'unité. Standing (1974) a déterminé l'émissivité des biscuits par des mesures de flux de chaleur à deux températures d'air d'un four électrique où seuls les effets de la radiation et la convection forcée sont étudiés. Ils ont trouvé aux hautes températures (265°C) une émissivité de 0,73 et 0,97 aux faibles températures (224°C) ce qui correspond à une moyenne de 0,85 dans cet intervalle de température. Zanoni *et al* (1995b) ont comparé les deux méthodes de mesure de la température de surface. Ils ont montré que la température mesurée par le thermocouple est inférieure à celle mesurée par le capteur infra-rouge. Ceci est attribué au fait que le thermocouple doit être positionné sous une fine couche de pâte ce qui ne permet pas de mesurer la température de surface réelle.

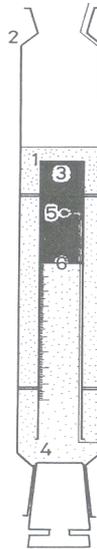
### *Perte de masse*

Le poids final du produit représente un critère de qualité à la vente. Il est obtenu à partir d'une masse de pâte initiale optimisée en tenant compte des différentes évolutions durant tout le procédé de fabrication (préparation, cuisson, refroidissement, conditionnement).

La plus grande partie des substances volatiles dégagées par le produit pendant la cuisson est constituée de vapeur d'eau, et en présence de poudre levante, de CO<sub>2</sub> et d'éthanol. Dans le cas de la génoise, la perte de masse est essentiellement due à l'évaporation de l'eau contenue dans la pâte.

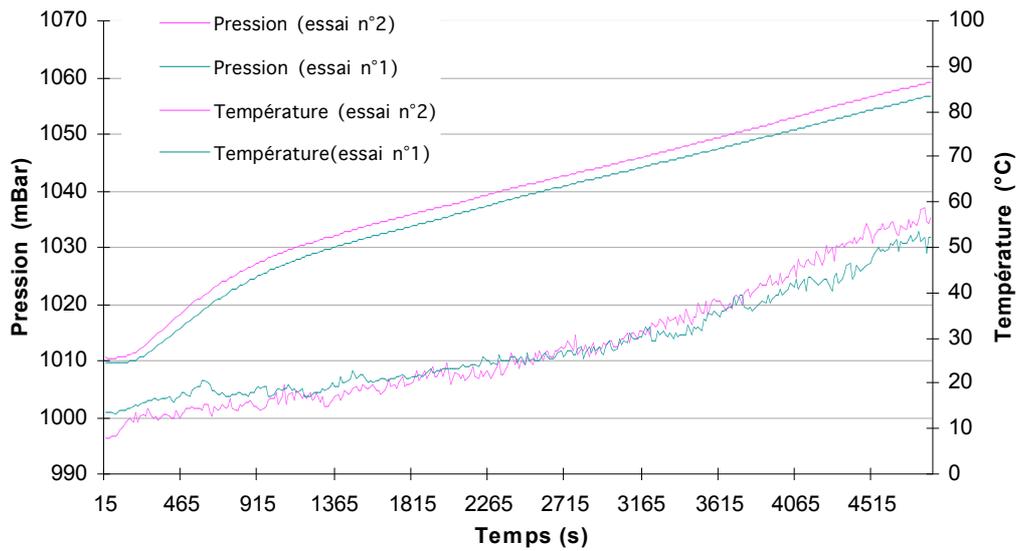
Généralement pour des montages pilotes, le produit en moule ou non, est relié à une balance, (supporté, Sommier *et al*, 2005 ; Lostie *et al*, 2002 ; ou suspendu, Hasatani *et al*, 1992). D'autres études ont évalué la perte de masse globale par mesure avant et après cuisson (Garisson et Peart, 1986 ; Baker *et al*, 1990 ; Sato *et al*, 1987).

Audidier (1968) présente la cinétique de perte de masse pendant la cuisson de trois types de produits céréaliers (biscuit type sablé, génoise et pain en moule) (Figure 10). Il a remarqué que la perte de masse est lente au début de la cuisson. Puis, dès que la température interne augmente l'évaporation est accélérée. Selon la nature du produit, cette cinétique est différente : une première période à vitesse croissante suivie d'une courte période à vitesse constante puis une période à vitesse décroissante dans le cas du biscuit. Dans le cas de produits plus humides (génoise, pain), la cinétique de perte de masse est similaire, et est représentée par une courte période à vitesse constante au début de la cuisson suivie d'une période plus longue à vitesse constante. Une accélération de la perte de masse est observée pendant la dernière période de cuisson.



**Figure 11 : Appareil pour la mesure du volume de la pâte à génoise et la température de dégagement de gaz (Mizukoshi *et al*, 1980).**

1 : cylindre gradué (20ml) ; 2 : 200 ml cylindre gradué avec bouchon ; 3 : pâte à génoise; 4: paraffine liquide; 5 : thermocouple; 6: interface pâte/paraffine liquide.



**Figure 12 : Cinétique de variation de la pression interne dans la génoise (2 essais, 160 °C, 80 min) (Sommier *et al*, 2002).**

### 1.3.3 Modifications physiques du produit

Durant la cuisson les variations de hauteur et de volume peuvent être importants. Ces variations accompagnent la perte de masse, engendrant une variation de la densité apparente. Ceci conduit à une structure et une porosité spécifiques de la mie et de la croûte et fortement dépendantes de la composition de la pâte (présence ou absence d'agent levant, mélange avec l'air) et du procédé de cuisson.

#### *Gonflement*

Pendant la cuisson, la pâte, initialement sous forme d'une émulsion aérée, est transformée en un solide alvéolaire poreux, mou et expansé. Le gonflement de la pâte pendant la cuisson est important à évaluer : il contribue à la structure spécifique de la génoise.

Dunn et White (1939) ont étudié la contribution de l'air à l'expansion lors de la cuisson de pâte quatre-quart (sans agent levant) dans un moule. Ils mesurent un gonflement nul avec un pâte sans air. Des mesures de volume sur les pâtes, avec et sans air, permettent de calculer le volume d'air introduit. Après cuisson, ils calculent la variation du volume de l'air due à l'élévation de température et en déduisent que l'augmentation de volume est due pour moitié à l'expansion thermique de l'air, l'autre partie étant attribuée à la vapeur d'eau. Mattil (1964) précise que la vapeur d'eau doit être associée à l'air présent dans la pâte pour contribuer au gonflement.

Bell *et al*, (1975) ont montré que l'expansion des bulles de gaz pendant la cuisson de génoise (avec matière grasse) n'est possible qu'à partir d'une température de 27-40°C. La diffusion des gaz des petites bulles vers les plus grandes commence vers 45-49°C et s'arrête à 76-88°C. L'accroissement maximum des bulles de gaz (de 20 µm au début de la cuisson jusqu'à 110-120 µm à la fin) est observé à des températures entre 70 et 80°C. Lostie *et al* (2002) ont remarqué que l'expansion maximale (caméra) de la génoise cuite pendant 4h en moule totalement isolé dans un four électrique sans circulation d'air, se produit dans un intervalle de température entre 45 et 85°C.

Mizukoshi *et al* (1980) utilisent un dispositif expérimental pour observer l'expansion de la pâte à génoise. La pâte constituée de farine, sucre, œufs, eau et agent moussant est placée dans un cylindre vertical gradué (20 ml) retourné (Figure 11). La surface de la pâte est au contact de paraffine liquide (bain thermostaté). Le volume (gonflement, bulles) et la température de la pâte sont mesurés en continu. Ce dispositif permet d'observer l'apparition de bulle au niveau de l'interface pâte/ paraffine. Ceci correspond à l'ouverture de la structure poreuse et la libération des gaz en cours de cuisson. En comparant les données de transmission de lumière (Figure 2) avec les mesures d'expansion observées, les auteurs proposent une interprétation du gonflement de la génoise : au début de la cuisson, le produit s'expande sous l'effet de l'augmentation de la pression des gaz dans les bulles. Pendant la cuisson, la transmission lumineuse augmente puis atteint un pic. Simultanément, une bulle de gaz à l'interface pâte/paraffine apparaît et l'expansion du produit s'arrête. Les auteurs concluent qu'à la fin de la gélatinisation, les parois des bulles sont rigidifiées et cèdent sous la pression des bulles libérant les gaz contenus dans les bulles et stoppant l'expansion.

#### *Pression interne*

Les pressions internes de la pâte à pain français et de la génoise ont été évaluées en introduisant un capteur embarqué dans la pâte au moment du façonnage (pain) ou de la mise en moule (génoise). Un capteur piézoélectrique Kulite (F69, Fr) donne une augmentation de



pression interne maximale de la pâte à pain de  $90 \pm 40$  mbar (Sommier *et al*, 2005). Ce capteur fournit des indications de pression en relation avec les variations thermiques. Dans le cas de la cuisson de génoise (sans agent levant) en moule à  $160^{\circ}\text{C}$ , un capteur à membrane NanoVacq (TMI Orion, Fr) a enregistré une augmentation de la pression interne de 35 mbar en fin de cuisson (81min, Figure 12) (Sommier *et al*, 2002). Dans le cas de la cuisson de pain français sur sole, le même capteur a enregistré une augmentation de pression entre 13 et 15 mbar sur une durée de 27 min (Sommier et Douiri, 2006).

#### *Hauteur, volume et densité*

Divers travaux se sont intéressés à la mesure de la masse et du volume, et de la masse volumique : par pycnométrie (Baik *et al*, 2000b ; Baker *et al*, 1990) de la pâte initiale à l'état liquide, semi-liquide ou durant la première période de cuisson (état semi-liquide) (Baik *et al*, 1999).

A l'état solide ou à la fin de la cuisson du produit (mie, croûte), le volume a été mesuré à partir des dimensions d'échantillons de géométrie régulière congelés (Baik *et al*, 1999) ; ou par une méthode de déplacement volumétrique (graines de sésame, de colza ou de millet ; billes de verre) (Sumnu *et al*, 2005; Sato *et al*, 1987; Bakshi *et al*, 1984; Hwang & Hayakawa, 1980) ; ou par analyse d'image en 3D (Baik *et al*, 2000b).

La masse volumique apparente du pain lors de sa cuisson a été déduite à partir de celle  $\rho_i$  des constituants (matière sèche et eau) pondérés par leur fraction massique  $x_i$ , et de la porosité  $\varepsilon'$  prise comme variable au cours de la cuisson. Dans le cas d'un produit se développant dans une seule direction (cas des produits en moules de diamètre fixe) la porosité peut être représentée par la variation de hauteur  $H$  en fonction du temps (Zanoni *et al* 1995 a, c).

Avec  $\rho = \sum \rho_i \cdot x_i - k \varepsilon(t)$  et  $\varepsilon = (H(t) - H_0) / H(t)$

$k$  étant un coefficient correcteur relatif à chaque produit.

Hwang et Hayakawa (1980) suivent l'évolution de la densité de trois biscuits différents dans deux fours commerciaux multi-zones à bande. La masse volumique des biscuits est déterminée en dehors du four (déplacement volumétrique avec billes de verre) pour des échantillons pris à 11 positions dans le four. Le produit subit un effondrement à la sortie du four entraînant une modification de la densité mesurée par rapport à celle évoluant dans le four. Les mesures couplées à de photos prises dans le four permettent de définir un facteur de rétrécissement. Ces mesures montrent que la taille du produit fini ne rend pas compte de celle en cours de cuisson.

La variation de la hauteur du produit lors de la cuisson a été enregistrée en continu dans un moule pilote à partir d'images prises grâce à une caméra à travers la porte du four (et à travers le moule muni d'une vitre) (Chevalier *et al* 2002; Sommier *et al* 2005; Lostie *et al* 2002).

La hauteur, le volume et la forme finale du produit contribuent ensemble à la qualité du produit final : surface plane adaptée au nappage, taille fixée par l'emballage, aspect général pour le consommateur. Ceci a motivé des recherches portant sur le contrôle de la symétrie du produit final. Celle-ci a été mesurée en comparant la hauteur au centre et sur les bords (Sato *et al*, 1987). Des mesures basées sur l'indice de symétrie (méthode AACC 10-91) ont été aussi menées (Baker *et al* 1990; Li & Walker, 1996) dans le but de contrôler la symétrie du produit lors de sa cuisson.

#### *Texture*

Les caractéristiques de texture représentent en fait des données empiriques permettant de définir le mieux possible les impressions ressenties par le consommateur (Kiger et Kiger, 1968). Tharrault (1992) énumère des méthodes sensorielles et d'autres instrumentales (mécaniques, acoustiques, structurales) pour évaluer les caractéristiques de texture des



produits de cuisson céréaliers. Il explique que l'aspect moelleux des produits peut être étudié par les méthodes mécaniques puisqu'elles correspondent à des appréciations proches de celles effectuées par le consommateur au moment de l'achat du produit.

L'évaluation de la texture des produits type génoise est faite à partir de tests de compression sur des produits cuits et refroidis, à l'aide de machine de traction-compression de type Instron (Attenburrow *et al*, 1989), un analyseur de texture (type TAXT2, Baik *et al*, 2000b ; Sahi et Alava, 2003 ; Morr *et al*, 2002 ; ou Rheolometer®, Sato *et al*, 1987). Ces études sont menées pour est évaluer l'effet des paramètres du procédé ou de la formulation (émulsifiants + quantité d'air) (Sahi et Alava, 2003) sur la qualité du produit cuit. Sato *et al* (1987) ont étudié l'effet de la vitesse et la température de l'air sur la texture de génoise cuite (four discontinu à circulation d'air). Li et Walker (1996) ont comparé la texture de gâteaux cuits dans des fours à jet et micro-ondes, et conventionnels et évalué l'effet de la variation de la température et du temps de cuisson : dans tous les cas la fermeté des gâteaux augmente avec l'augmentation des paramètres étudiés. Dans un four tunnel, la position de biscuits (différentes formes et ingrédients) au centre ou sur les côtés du tapis, n'a pas d'influence significative sur la texture des produits cuits. Après une période de stockage de 21 jours, Baik *et al* (2000b) observent une augmentation de la fermeté des gâteaux d'un facteur de 1,8 à 3 par rapport au produit juste après cuisson.

La qualité d'une génoise se traduit par son aptitude à garder l'air incorporé lors de la préparation pour éviter son rétrécissement après la cuisson. La fermeté de la génoise est très liée à la masse volumique de la pâte initiale : une pâte à faible masse volumique conduit à de la mie très dense et par conséquent une génoise ferme.

#### *Coloration interne et en surface*

Plusieurs techniques sont utilisées pour suivre les variations de couleur d'un produit pendant la cuisson. Le prélèvement d'échantillons et la mesure à l'aide d'un colorimètre sont le plus souvent utilisés (Zanoni *et al*, 1995b ; Chevallier *et al*, 1995 ; Baik *et al*, 2000b ; Li et Walker 1996, Sato *et al*, 1987, Shibukawa *et al*, 1989).

Shibukawa *et al* (1989) ont déterminé l'effet du chauffage par convection et par radiation sur la couleur de surface des biscuits dans un four à 180°C jusqu'à 240°C. La couleur a été évaluée à différents temps de cuisson par rapport à la luminance et comparée au brunissement d'une solution modèle de glutamate de sodium et de glucose. Ils ont montré que la coloration dépend principalement de la température de surface. Pour une même température de l'air, la température de surface du biscuit augmente plus rapidement par radiation que par convection, d'où une coloration plus rapide. La température de l'air a un effet significatif sur la luminance finale du biscuit (L) et peu sur les valeurs finales des indices de couleur a et b (Savoie-Barbotteau, 1993).

La détermination de la couleur se fait aussi par l'analyse directe des biscuits par un panel de personnes expérimentées et l'évaluation de la couleur sur une échelle allant du très clair au très foncé (Garisson et Peart, 1986 ; Skjodebrand et Andersson, 1989). MacFarlane (1985) a élaboré un capteur optique pour mesurer la couleur du produit en sortie du four industriel, automatiquement comme un outil de contrôle du procédé de cuisson.



## 1.4 Conclusion

Lors de la cuisson de produits céréaliers, la qualité du produit fini est le résultat des modifications physicochimiques (gélatinisation, gonflement, couleur ...) se produisant pendant la période de chauffage, se prolongeant lors du refroidissement puis de la conservation. Des études ont été menées sur des fours de taille industrielle utilisant différents modes de transfert de chaleur. Les mesures en ligne concernent essentiellement les températures de l'air et du produit, l'humidité et la vitesse de l'air si la température n'est pas trop élevée. Les mesures plus spécifiques sont réalisées sur des échantillons prélevés en cours ou en fin de cuisson : viscosité de la pâte, couleur et gonflement du produit. Des installations pilotes permettent d'obtenir plus d'information en cours de cuisson : les températures internes et de surface du produit, le rôle joué par le moule dans les différents transferts de chaleur, la masse et la pression interne du produit, les transformations de la pâte en mie et croûte en surface. Les études portent principalement sur la période d'apport de chaleur au produit mais ne s'intéressent pas à la phase de refroidissement où les transferts de chaleur internes continuent d'évoluer.

La masse volumique, paramètre important dans la caractérisation de la qualité du produit, est souvent mesurée en dehors du four après refroidissement mais sa variation au cours du procédé n'est pas évaluée.

Notre étude est réalisée sur la cuisson d'un produit de type génoise dans un four à circulation forcée en distinguant les phases de chauffage (à différentes températures) et de refroidissement (en conditions contrôlées constantes). On s'est attaché à développer l'instrumentation, l'acquisition et le traitement des données en ligne pour contrôler la fiabilité de l'installation et le déroulement du procédé (homogénéité en température du four, transferts de chaleur à travers un moule spécifique). L'objectif est d'obtenir un maximum de données en cours de cuisson afin de mettre en évidence les phénomènes prenant part à la cuisson et leurs interactions.



## **2 Matériels et méthodes**

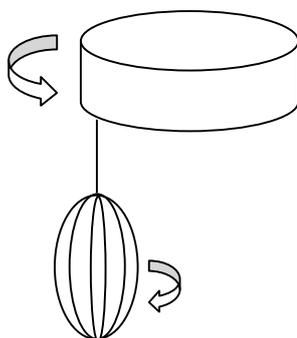


Figure 13 : Principe de fonctionnement du batteur planétaire

Tableau 4 - Etalonnage des vitesses de rotation du mixer utilisé pour préparer la pâte

Réglage mixer	1	2	4	6	8	10
Vlue (m /min)	14,4	21	33	42	51	70
V robot (tr/min)	58,8	85,7	134,7	171,4	208,1	285,7

Tableau 5 - Recette de la génoise

Ingrédients	Masse (g) (%)	Conditions de mélange (indication du mixer et vitesse correspondante mesurée)	Temps (s)
Blanc d'oeuf	195 (16.6)	V = 10 ; 286 tr/min	10
Jaune d'oeuf	170 (14.47)		
Sucre en poudre	365 (31.06)	V = 6 ; 171 tr/min	612
Farine de blé type 55	365 (31.06)	Ajout à V = 2 ; 86 tr/min	60
		Puis mélange à V= 2 ; 86 tr/min	132
Eau désionisée	80 (6.81)	V = 10 ; 286 tr/min	60
Pâte 1175g (100%) -> 700g (~942 cm <sup>3</sup> ) dans le moule			

## 2.1 Produit : la pâte à génoise

La recette de génoise utilisée a été mise au point lors d'une étude précédente visant à optimiser les quantités des différents ingrédients et leur mélange [Lassoued, 2001]. C'est une recette sans ajout d'agent émulsifiant et de poudre levante (Tableau 5) visant à retrouver une bonne expansion du produit pendant la cuisson. L'expansion au cours de la cuisson sera due principalement à l'air introduit lors de la préparation de la pâte pendant la phase de battage.

Les ingrédients sont constitués de :

- Farine de blé type 55 (Moulin Soufflet) : même lot utilisé pour tous les essais, réparti en sacs de 400g et congelés à  $-20^{\circ}\text{C}$ . la décongélation est assurée pendant une demi journée avant chaque expérience à  $4^{\circ}\text{C}$ .
- Sucre en poudre (Saint Louis) : même lot utilisé pour tous les essais, stocké dans des paquets de 1kg à la température ambiante.
- Œufs frais (Cora): commercialisés le jour de la ponte avec une durée de conservation de 23 jours. Après achat, les œufs sont stockés à  $4^{\circ}\text{C}$
- Eau désionisée, à température ambiante.

Après pesée, la farine et les œufs sont portés à une température de  $24^{\circ}\text{C}$  en utilisant un bain-marie (Polystat 86666, Fisher Bioblock Scientific). La génoise est obtenue en mélangeant progressivement les différents ingrédients (œufs, farine, sucre et eau) à  $24^{\circ}\text{C}$  dans un mélangeur de type KitchenAid Professional, K45SS. Deux vitesses de mélange sont utilisées, la première pour fraser les différents ingrédients (opération de mélange) et la seconde pour homogénéiser et incorporer de l'air au mélange (opération de battage). Un fouet en acier inoxydable est utilisé pour la préparation de la pâte. Deux mouvements simultanés (cf. Figure 13) sont assurés par le fouet : une rotation autour de son axe et une autre balayant la circonférence du bol fixe. Les deux mouvements sont effectués dans des sens opposés afin de garantir un meilleur battage en couvrant la totalité du bol.

*Le réglage de la vitesse* du KitchenAid s'effectue en réglant la position d'un curseur entre 1 et 10. La vitesse de rotation a été mesurée avec un compte-tours chronométrique (type A, ZIVY, France). Il est constitué d'un compteur de vitesse ( $\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$ ) sur lequel peuvent se fixer trois « broches » rotatives : deux cylindriques ( $\varnothing = 3,2 \text{ cm}$ ,  $e = 0,5$  ; ou  $\varnothing = 1,3 \text{ cm}$ ,  $e = 0,8 \text{ cm}$ ) ou une conique ( $\varnothing = 1,4 \text{ cm}$ ,  $e = 0,4 \text{ cm}$ ). Pour mesurer la vitesse de rotation du robot, la tête de la broche (anneau caoutchouté de périmètre connu) est mise au contact de l'axe (entraînement) tournant du mixer dont on veut déterminer la vitesse de rotation. La mesure ainsi effectuée donne le nombre de tours par minute de la broche rotative et la vitesse linéaire de celle-ci en multipliant par son périmètre. La vitesse de rotation de l'axe du mixer est obtenue en divisant cette vitesse linéaire par la circonférence de l'axe du mixer ( $\varnothing = 7,8 \text{ cm}$ ). Dans notre cas la grande broche cylindrique est utilisée ( $\varnothing = 3,2 \text{ cm}$ ) car elle correspond à un entraînement efficace. Les vitesses mesurées sont données dans le Tableau 4.

La recette (Tableau 5) consiste à homogénéiser les jaunes et les blancs d'œufs à vitesse maximale (10, correspondant à  $286 \text{ tr}/\text{min}$ ) pendant 10 s. Le sucre en poudre est ajouté, puis le mélange est battu à une vitesse moyenne (6) pendant 612 s. La farine (non tamisée) est ensuite ajoutée sur une durée de 60 s à faible vitesse (2). Le tout est mélangé à la même vitesse pendant 72 s. Enfin l'eau est ajoutée et tous les ingrédients sont mélangés à vitesse maximale pendant 60 s. La pâte est ensuite versée dans le moule avant enfournement. La quantité de pâte utilisée pour une cuisson est égale à  $\sim 700 \text{ g}$  (soit  $942 \text{ cm}^3$ ). L'enfournement est réalisé après un temps de repos de 10 min nécessaire à la préparation des différents outils d'instrumentation associés à la cuisson.

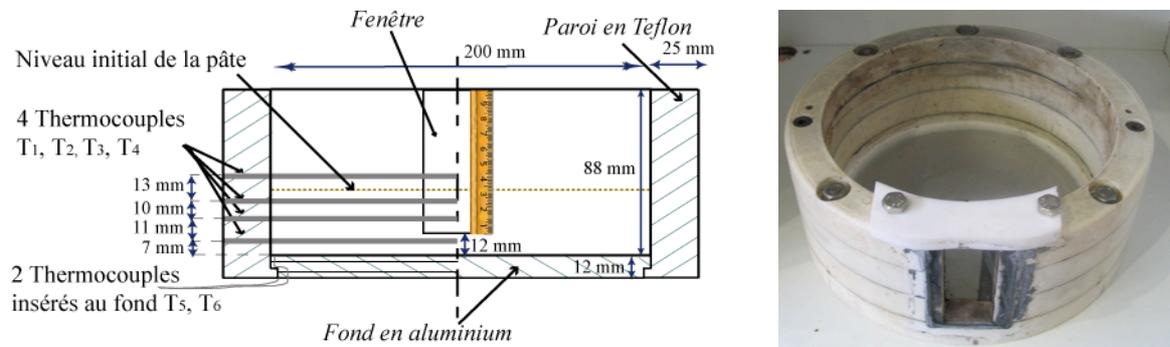


Figure 14 : Moule de cuisson ( $\phi = 25 \text{ cm}$  ;  $H = 10 \text{ cm}$ )

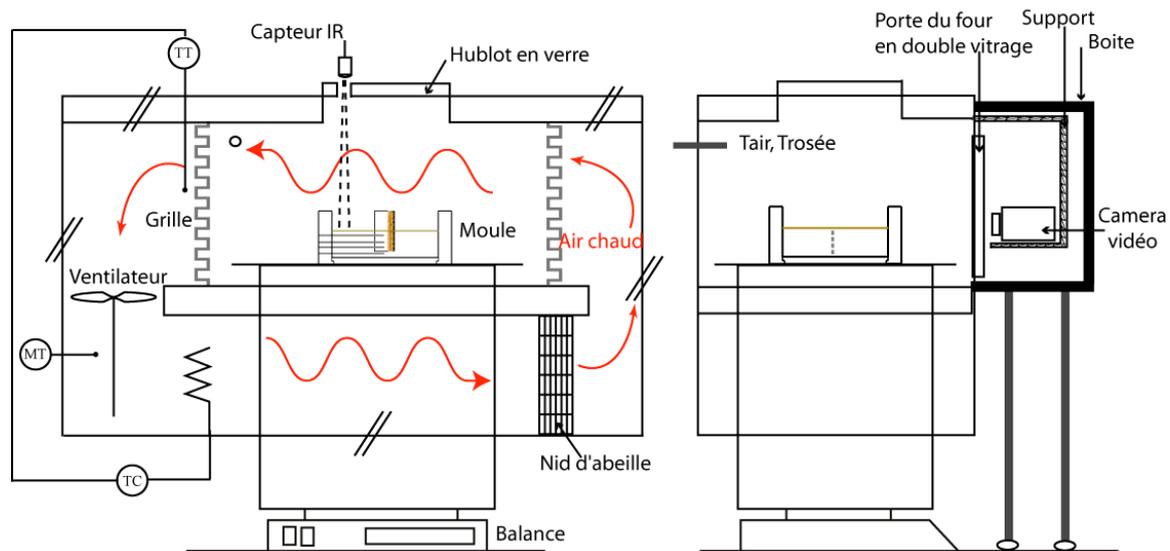


Figure 15 : Four pilote instrumenté

La quantité d'air contenu dans la pâte est estimée en préparant une pâte témoin sans ajout d'air pendant le pétrissage, c'est-à-dire en travaillant les ingrédients sous vide. Un mélangeur KitchenAid a été modifié pour permettre :

-de thermostatier la pâte durant le battage avec un bol à double enveloppe

-de fermer le bol de façon étanche avec un couvercle en plexiglas avec joint en caoutchouc, lors des phases de battage.

-d'être connecté à une pompe à vide par un connecteur hydraulique (150 mbars)

Un essuie glace pour le couvercle et un racleur de bol sont fixés sur l'axe de rotation du pétrin afin d'éviter l'accumulation de pâte sur les parois.

Ainsi les ingrédients ont été mélangés pendant 15 minutes à vitesse moyenne. La masse de 50 ml de pâte est mesurée égale à 63,217 g, ce qui correspond à une masse volumique « sans air » de 1,264 g/cm<sup>3</sup>. Le pourcentage d'air (en volume) dans la pâte servant aux essais est calculé à partir des données de la pâte aérée (700 g, 942 ml, 0,743 g/cm<sup>3</sup>) et de la même masse de pâte non aérée (554 ml). Il correspond à un taux de foisonnement (augmentation de volume) de 70% en volume (Clarke, 2004) correspondant à 41% d'air (en volume) dans la pâte.

$$\text{Taux de foisonnement} = (V_{\text{pâte aérée}} - V_{\text{pâte sous vide}}) \cdot 100 / V_{\text{pâte sous vide}}$$

## 2.2 Le moule de cuisson

Le moule cylindrique ( $\varnothing = 20$  cm, H = 10 cm) (Figure 14) a été fabriqué par Techno Meca (Missillac, Fr). Les parois latérales isolantes (25 mm d'épaisseur) sont en Téflon (PTFE). Ce matériau a été choisi pour son faible coefficient de transfert thermique ( $\lambda = 0.43$  W/m.K à 277°C). Le fond du moule, en aluminium (12 mm) est amovible afin de faciliter le démoulage : il est fixé avant chaque essai grâce à un joint en colle silicone. Le fond du produit est chauffé par contact alors que la surface est chauffée à la fois par convection et par rayonnement. La paroi latérale du moule comporte une fenêtre avec double vitrage transparent qui permet de suivre le gonflement du produit lors de la cuisson. Compte tenu de la faible surface du vitrage par rapport à la surface externe du moule en Teflon (rapport =  $6 \cdot 10^{-2}$ ), les apports de chaleurs à travers ce vitrage peuvent être négligés.

Le volume disponible dans le moule permet de cuire 940 cm<sup>3</sup> de pâte (environ 700g) avec un gonflement tel que tout le produit se développe à l'intérieur du moule (surface à ~3 cm du haut du moule).

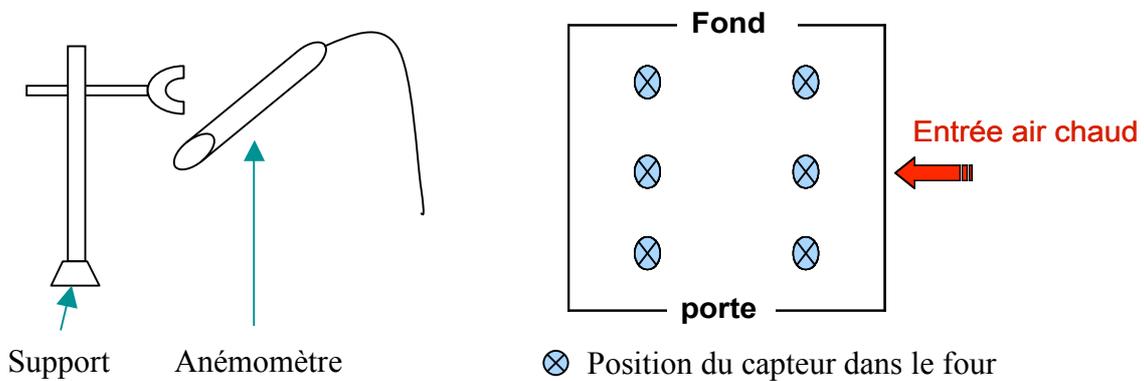
## 2.3 Le four de cuisson

La cellule de cuisson discontinue est un prototype spécialement conçu par l'entreprise Servathin (Fr). Le volume de cuisson est de 75L (500 x 500 x 300 mm) (Figure 15). L'air est chauffé par 3 résistances électriques (3 x 5 kW) associées à un régulateur (Eurotherm 900ECP, Fr) de type Proportionnel Intégral (PI), permettant de régler la température du four de 50 à 300 ± 0,5°C. Le flux d'air peut être latéral (parallèle à la surface du produit) ou vertical par le haut du four (perpendiculaire au produit). L'air chaud est en recirculation, avec des apports d'air ambiant en fonction de la régulation de température. Le four n'est pas parfaitement étanche, en particulier au niveau des tiges de liaison à la balance et des divers instruments de mesure.

L'hygrométrie et les vitesses d'air sont contrôlables. La vitesse de l'air est réglée à l'aide d'un potentiomètre qui fixe la fréquence du ventilateur.

**Tableau 6 - Variation maximale de la température de l'air du four et moyenne de la vitesse d'air mesurée pour trois températures de consignes.**

Consigne de température	Vitesse air (m/s)	Variation maxi par niveau (°C)	Ecart maxi dans tout le four (°C)
150°C – 25 Hz	3,4 ± 0,19	1,6	5,8
160°C – 25 Hz	3,5 ± 0,07	1,6	6,5
170°C – 25 Hz	3,4 ± 0,30	1,6	6,3



**Figure 16 : Dispositif utilisé pour mesurer la vitesse de l'air dans le four (anémomètre  $\varnothing = 3,5$  cm L = 20cm)**

La vitesse de l'air peut varier entre 1 et 7 m/s avec une précision de  $\pm 0,5$  m/s (mesures réalisées à froid par le constructeur de la cellule).

L'humidité de l'environnement de cuisson peut être contrôlée en fixant la consigne de la température de rosée. La régulation de cette température (entre  $+ 40^{\circ}\text{C}$  et  $+ 76^{\circ}\text{C}$  ; soit 50 à 400 g d'eau/kg d'air sec) se fait par injection de vapeur produite par un générateur de vapeur selon les mesures effectuées par une sonde capacitive.

*Dans cette étude*, l'air ambiant chauffé est soufflé parallèlement à la surface du produit, à travers un nid d'abeille, puis à travers une grille (paroi latérale de la cellule de cuisson) favorisant l'homogénéisation des vitesses d'air en tout point de la section du four. La vitesse d'air a été maintenue constante en choisissant une fréquence de ventilation fixe (25 Hz) pour tous les essais. Les essais de cuisson ont été effectués à trois températures (160, 180 et  $220^{\circ}\text{C}$ ), proches de celles utilisées en industrie et en cuisine pour les produits de type génoise.

## 2.4 Instrumentation pour des essais de cuisson et acquisition des données

### 2.4.1 Le four et l'air de chauffage

#### 2.4.1.1 Vitesse de l'air

La vitesse de l'air dans le four est mesurée à l'aide d'un anémomètre à moulinet (Hontzsch Instruments, Allemagne), utilisable pour des températures allant jusqu'à  $350^{\circ}\text{C}$ . Sa gamme de vitesse s'étend de 0,3 à 20 m/s avec une précision de  $\pm 0,1$  m/s. Le capteur à moulinet mesure une vitesse de rotation proportionnelle à la vitesse d'écoulement  $v$  du fluide dans lequel il est immergé. La vitesse de rotation du moulinet est obtenue par un détecteur de proximité inductif : la mesure est affichée en m/s. Le capteur et son conditionneur de signal (afficheur) sont livrés avec certificat d'étalonnage.

La distribution de la vitesse de l'air à l'entrée et à la sortie de la cellule de cuisson a été mesurée lors d'essais sans produit, aux températures utilisées dans les essais. Le capteur est fixé sur un support pour pouvoir le déplacer dans le four, face au courant d'air. Ce système (capteur + support) a été placé à l'entrée et à la sortie du flux d'air dans le four, en 3 positions différentes : au fond du four, au centre et au niveau de la porte (Figure 16).

L'anémomètre est relié à une centrale d'acquisition (National Instrument, modèle PCI 4351). En faisant varier la fréquence du ventilateur (15-30Hz) il a été possible d'établir une relation entre la vitesse affichée (capteur) et la tension délivrée (conditionneur) envoyée à la centrale de mesure.

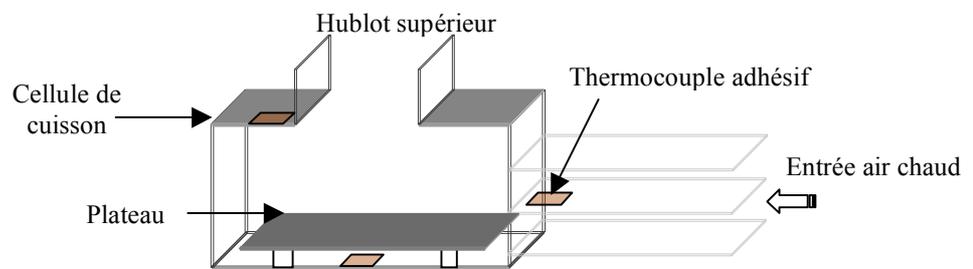
$$v = -4,93 U + 16,60$$

La vitesse de l'air a été mesurée pour trois températures de consignes ( $150^{\circ}\text{C}$ ,  $160^{\circ}\text{C}$  et  $170^{\circ}\text{C}$ ) pour une fréquence de ventilation de 25 Hz.

Pour  $160^{\circ}\text{C}$ , la vitesse de l'air est en moyenne égale à 3,5 m/s avec une variation maximale dans le four de 0,3 m/s.

Le capteur à moulinet utilisé pour la détermination de la vitesse de l'air dans le four, possède une inertie dans le temps et dans l'espace l'empêchant de détecter les faibles fluctuations de vitesse. Ces fluctuations sont minimisées par la présence de la grille dans le four ainsi que du nid d'abeille placé en amont de la cellule de cuisson.

Ainsi, pour une vitesse moyenne de 3,5 m/s, le débit de l'air traversant la section d'entrée de la cellule de cuisson ( $S = l \times H = 55 \times 27 \text{ cm}^2$ ), est égal à  $519,75 \text{ l.s}^{-1}$ . Ceci implique un renouvellement de l'air de la cellule en moyenne 7 fois par seconde, ce qui contribue à la stabilité de la température dans la cellule.



**Figure 17 : Position des thermocouples adhésifs dans la cellule de cuisson pour la mesure de la température des parois du four.**

Pour caractériser la nature de l'écoulement de l'air à l'entrée de la cellule de cuisson, il est possible de calculer le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\bar{v} \times D_h}{\nu}$$

avec

$\bar{v}$  : vitesse moyenne de l'air, 3,5 m/s

$\nu$  : viscosité cinématique de l'air à 160°C, à pression atmosphérique, soit  $29,85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$D_h$  : diamètre hydraulique, avec  $D_h = 4 \times \text{section droite} / \text{périmètre mouillé}$ , soit  $D_h = 0,36 \text{ m}$ .

Soit une valeur pour Re de 42470 ( $> 2000$ ), correspondant à un écoulement turbulent à l'entrée de la cellule de cuisson. La présence du moule sur le parcours de l'air va perturber cet écoulement de l'entrée.

#### 2.4.1.2 Humidité de l'air

L'humidité de l'air du four pendant les essais, est déduite des mesures de température de rosée et de température de l'air du four. La température de rosée est mesurée à l'aide d'un hygromètre à condensation (Hygro M4 SIM-12H, General Eastern, Etats Unis), composé d'un miroir chauffé ou refroidi par un élément Peltier. La température du miroir est mesurée et régulée. Une détection optique permet de repérer avec précision l'apparition de condensation sur la surface refroidie. La température du miroir est ensuite régulée autour de cette valeur pour affiner la mesure. Une pompe permet d'aspirer en continu l'air du four à travers un tube chauffé à une température constante (90°C, thermostat) afin d'éviter une éventuelle condensation entre le point de prélèvement d'air et le point de mesure. L'hygromètre utilisé permet de mesurer des températures de rosée allant de -10°C à +85°C avec une incertitude de  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ .

Le miroir est nettoyé à chaque mise en route de l'appareil grâce à une phase de refroidissement puis de chauffage. Cependant il est préférable d'effectuer un nettoyage manuel avant toute série de mesure.

#### 2.4.1.3 Température de l'air

Des essais de chauffage ont été réalisés dans le four sans produit, pour vérifier l'homogénéité de la température à l'aide d'un ensemble de thermocouples répartis dans l'enceinte (sur grille, voir résultats).

Durant les essais de cuisson, la température de l'air du four est mesurée au moyen d'un thermocouple type K (2 mm, 50°C à +250°C, isolé Téflon) placé dans la cellule de cuisson, au niveau de la sortie de l'air. Ces thermocouples ont été étalonnés.

#### 2.4.1.4 Température des parois du four

Pour mesurer la température des parois de la cellule de cuisson, des thermocouples adhésifs type K (0,2 mm, -50°C à +250°C, isolés Téflon) ont été utilisés. L'extrémité sensible de ce type de thermocouple est fixée sous une pastille adhésive (25\*20 mm) haute température en soie de verre imprégnée PTFE.

Nous avons mesuré la température de « surface » en quatre positions : les parois supérieure et inférieure de la cavité de cuisson, sur le support du moule et à l'entrée de l'air dans le four au niveau des ailettes (Figure 16).

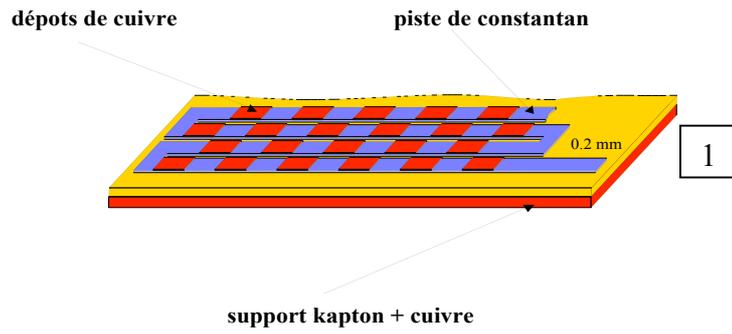


Figure 18: Thermopile planaire

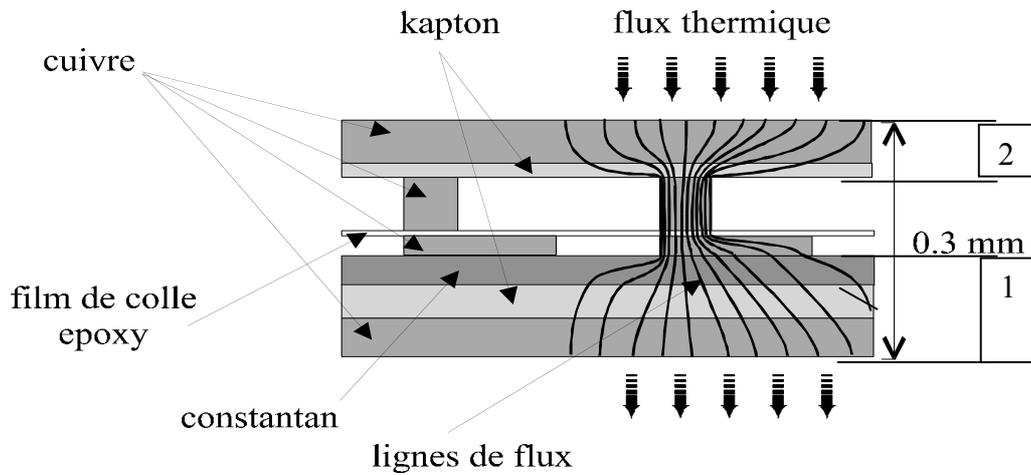


Figure 19 : Cellule fluxmétrique

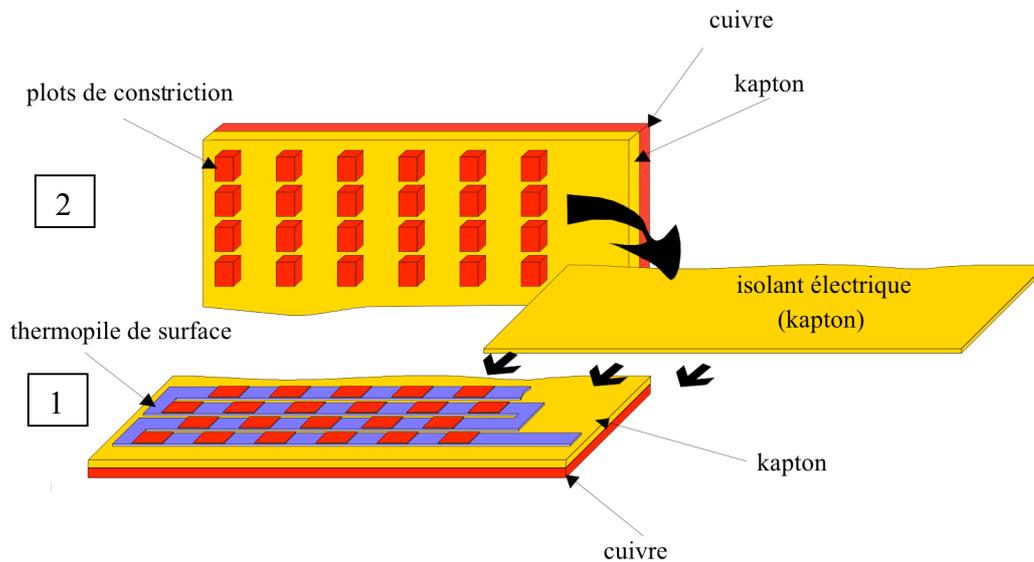


Figure 20 : Méthode de fabrication du capteur de flux (documentation Captec®)

## 2.4.2 Les mesures de flux de chaleur reçus par le produit dans le moule

Le produit va recevoir de la chaleur par le fond du moule (contact) et par sa surface (rayonnement des parois du four et convection de l'air)

### 2.4.2.1 Transfert par contact

Pour mesurer le flux de chaleur par contact, deux thermocouples type K ( $\varnothing = 90 \mu\text{m}$ ,  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , gainé PTFE, Oméga<sup>®</sup>) ont été insérés dans le disque en aluminium qui sert de fond au moule (Figure 14). Deux rainures (0,5 mm de profondeur et de 100 mm de longueur) ont été usinées de part et d'autre du fond du moule, chacune d'entre elles étant un rayon du disque ; elles sont rigoureusement symétriques par rapport au plan médian du disque. Une fois le thermocouple déposé dans la rainure, il est recouvert avec une résine époxy chargée de particules d'aluminium ; puis nous fixons un scotch sur la résine pour maintenir le thermocouple et la résine durant la phase de réticulation de celle-ci. Enfin l'ensemble obtenu est poncé afin d'éliminer les défauts de surface.

### 2.4.2.2 Flux radiatifs et convectifs

Des capteurs de flux (20\*20\*0,4 mm en cuivre) (Captec<sup>®</sup>) ont été spécialement conçus et utilisés pour évaluer les densités de flux radiatif et convectif reçues par le produit en cours de cuisson dans le moule. La mesure du flux thermique à gradient tangentiel est obtenue à partir de la différence des températures entre deux faces planes par une thermopile uniformément distribuée sur la surface du capteur.

*Un fluxmètre thermique à gradient tangentiel* comporte :

-*Une thermopile planaire* (Figure 18) constituée par un ruban métallique (chromel ou constantan) de faible épaisseur (25  $\mu\text{m}$ ) gravé en forme de maille grecque sur support isolant souple (kapton ou mylar). Pour obtenir une thermopile planaire, le ruban métallique est recouvert par un grand nombre de dépôts électrolytiques (cuivre) régulièrement espacés sur le ruban de constantan. Dans les régions recouvertes par les électrodes plaquées, les propriétés du circuit sont celles du matériau de plaquage et le circuit se comporte comme un grand nombre de thermocouples connectés électriquement en série, les jonctions thermoélectriques étant localisées sur les lignes frontières des dépôts électrolytiques. La mise en œuvre des techniques de photolithographie et de gravure chimique utilisées pour la fabrication des circuits imprimés permet de réaliser des thermopiles planaires comportant une densité de thermocouples de l'ordre de 3300/dm<sup>2</sup>.

-*Une partie supérieure* ayant pour fonction de générer, entre les jonctions de chacun des thermocouples, une différence de température proportionnelle au flux thermique à mesurer. Cette fonction est réalisée en établissant un contact thermique localisé entre l'une des jonctions de chacun des thermocouples et la face supérieure du capteur (feuille de cuivre de 35  $\mu\text{m}$  d'épaisseur). Le schéma d'une cellule fluxmétrique est représenté (Figure 19). Lorsque la chaleur traverse le capteur en partant de la face supérieure, il y a constriction des lignes de flux thermique vers les régions où il y a contact thermique et la différence de température entre jonctions thermoélectriques dépend de la distribution des lignes de flux dans l'épaisseur de la thermopile et de son support.

En pratique, le plot de constriction est gravé sur une surface cuivrée (Figure 20) et les contacts thermiques sont réalisés en collant, après positionnement correct, la partie supérieure du capteur sur la surface de la thermopile planaire.

*Caractéristiques* : la sensibilité est déterminée par étalonnage en faisant passer un flux thermique de 1 W/m<sup>2</sup> à travers la surface active du capteur placé sur une plaque à température constante. La densité surfacique de thermo-éléments étant uniforme, la sensibilité est

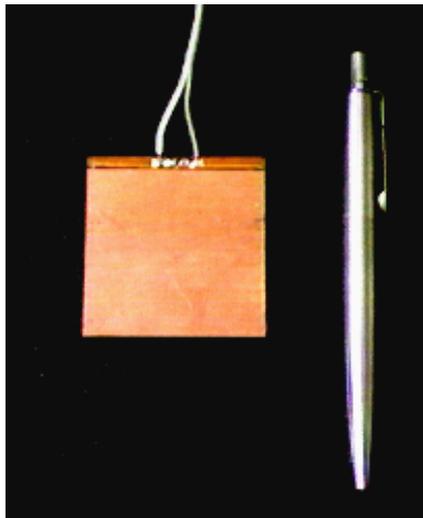


Figure 21 : Exemple de fluxmètre

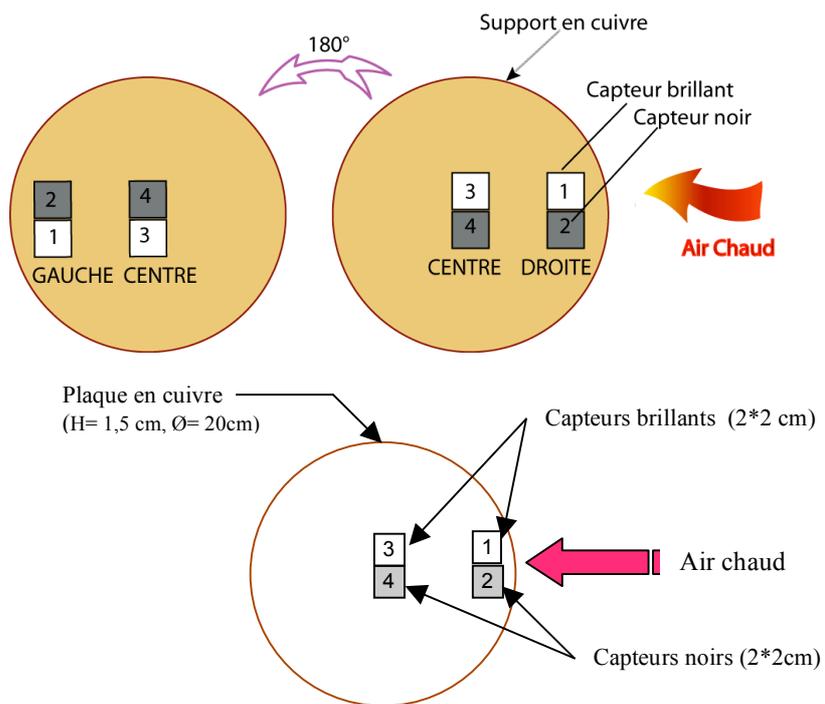


Figure 22 : Position des capteurs de flux sur la plaque d'étude

Tableau 7 : sensibilité des capteurs de flux

Capteur	1 (alu)	2 (noir)	3 (alu)	4 (noir)
Sensibilité ( $\mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )	3,52	3,44	3,53	2,92

directement proportionnelle à la surface du capteur. Elle est voisine de  $50\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^2$  pour un fluxmètre de surface  $1\text{ dm}^2$ . La sensibilité des capteurs que nous avons utilisé est indiquée dans le Tableau 7.

Les fluxmètres thermiques ayant l'avantage d'avoir une résistance électrique relativement faible, de l'ordre de  $200\ \Omega/\text{dm}^2$  de surface active, la tension de sortie minimale détectable dépend de la résolution de l'amplificateur ou du microvoltmètre utilisé pour effectuer la mesure.

Le grand avantage des fluxmètres à gradient tangentiel est de permettre la miniaturisation des capteurs et la réalisation de microcapteurs en couches minces déposées directement sur la surface de la paroi à instrumenter. Un autre avantage essentiel est leur faible épaisseur, ce qui donne un capteur peu perturbateur de la mesure. De plus, cette faible épaisseur permet d'obtenir des capteurs souples qui peuvent être appliqués sur des surfaces courbes (tuyaux...) ce qui étend leur domaine d'utilisation. L'inconvénient de ces capteurs est que le flux mesuré n'est pas indépendant de la température du capteur, ils seront donc exclusivement utilisés pour calculer les coefficients d'échange radiatif et convectif et interpréter qualitativement la répartition des flux dans une enceinte de cuisson.

Nous voyons un exemple de capteur fluxmétrique de faible taille (Figure 21). Ce type de capteur peut cependant avoir une taille et une forme quelconque et être plus ou moins souple. Dans notre application, nous avons utilisé des fluxmètres que nous avons collés à la surface d'une plaque en cuivre.

Deux types de capteurs ont été utilisés (Figure 22) : deux capteurs brillants (1, 3) pour mesurer la densité de flux convectif, et deux capteurs à surface noire (2, 4) pour mesurer la densité de flux total (radiatif et convectif). La partie brillante ou noire du capteur est la surface supérieure en cuivre (Figure 21).

Tous les capteurs sont dotés de thermocouple type T pour la mesure de la température du capteur. La calibration de ces capteurs a été effectuée par le fabricant.

Les capteurs ( $20*20*0,4\text{mm}$ ) sont collés sur une plaque de cuivre cylindrique servant de puits thermique ( $\varnothing = 200\text{mm}$ ,  $e = 15\text{mm}$ ). Le collage (réversible) est réalisé avec des gouttes de lait. La plaque en cuivre supportant les capteurs de flux, couvrant la totalité de la surface interne du moule, a été posée sur deux supports en Téflon pour simuler le niveau initial de la pâte ( $H_0 = 30\text{ mm}$ ). Un capteur de chaque type a été fixé en trois positions : au centre de la plaque et deux à la périphérie de la plaque. Cet ensemble placé dans le moule (plaque + 4 capteurs) est orienté soit vers l'entrée de l'air (droite du moule) ou vers la sortie de l'air (à gauche du moule) dans la cellule de cuisson (Figure 22).

Les signaux (flux + température) ont été enregistrés toutes les 18 secondes.

## 2.5 Mesures sur le produit pendant la cuisson

### 2.5.1 Pesée du produit dans le moule

La masse du produit est mesurée pendant la cuisson. Le moule et la pâte reposent sur un support relié à une balance disposée en dehors du four. Le support (plaque inox pleine :  $500\text{ mm}*500\text{ mm}*2\text{ mm}$ ) situé à  $5\text{ cm}$  de la paroi inférieure de la cellule de cuisson, repose sur 4 tiges métalliques filetées. Les tiges qui traversent la partie inférieure du four sont reliées à une seconde plaque identique qui repose sur le plateau d'une balance industrielle (SB, Mettler Toledo) de portée comprise entre  $51\text{g}$  et  $32\text{ kg} \pm 1\text{ g}$ . Pendant la cuisson, le programme de supervision arrête la ventilation  $3\text{ s}$  toutes les  $18\text{ s}$  afin d'éviter les vibrations du plateau pendant l'acquisition de la masse.

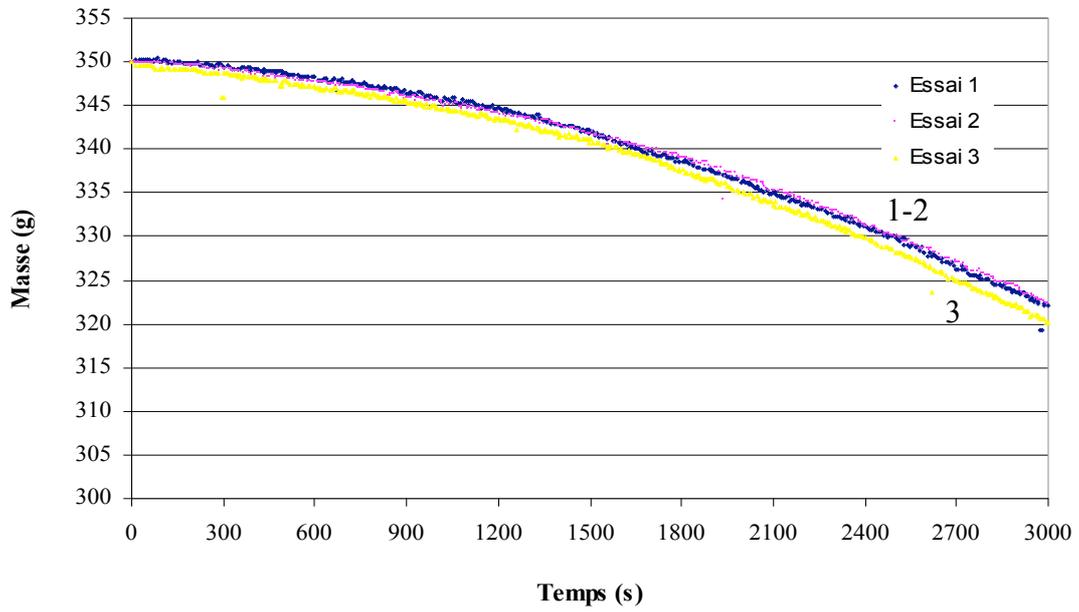


Figure 23 : Cinétique de perte de masse de l'eau dans une boîte de conserve (160°C - 3,5m/s).



Figure 24 : Capteur autonome de pression et température (NanoVACQ NVQ/PT-TC  $\varnothing = 3,5$  cm, L = 3,5cm)

Tableau 8 - Certificat d'étalonnage TMI Orion N° P41848

Température (°C)	Pression de calibration (mbar)	Pression enregistrée (mbar)	Erreur (mbar)
-0,04	1000	1000	0
30,03	1000	1001	+1
60,02	1000	999	-1
90,01	1000	1002	+2
120,03	1000	999	-1

Zone de mesure

Le fonctionnement a été vérifié en chauffant un récipient contenant 350 g d'eau dans le four à 160°C avec une vitesse d'air de 3,5 m/s (Figure 23). La masse initiale mesurée est de 350 g et le suivi de la pesée au long de l'essai est correcte et reproductible.

### **2.5.2 Températures à l'intérieur du produit**

Quatre thermocouples type K ( $\varnothing = 1$  mm, isolés et gainés en soie de verre,  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ) insérés dans un tube en acier inoxydable ( $\varnothing = 2$  mm, L = 100 mm) sont placés dans différents plans horizontaux du moule supposés isothermes. Ils sont reliés à une carte d'acquisition (PCI 4351, National Instrument) pour assurer l'enregistrement des températures au centre du produit, à différentes hauteurs 4, 18, 28, 41 mm par rapport au fond du moule (Figure 14). Au début de la cuisson trois thermocouples sont plongés dans le produit tandis que le plus éloigné du fond se trouve dans l'air au dessus du produit ; il se trouvera dans le produit à 2 cm de la surface après cuisson et gonflement.

### **2.5.3 Température de surface du produit**

La température de surface du produit est mesurée pendant la cuisson au moyen d'un capteur infra-rouge (AHLBORN, AMIR 7842, Allemagne). Un système optique intercepte l'énergie rayonnée par le produit et la concentre sur un détecteur (transistor sensible au rayonnement IR). L'énergie reçue par le détecteur est amplifiée et convertie en un signal électrique puis en température, enregistrée par l'ordinateur.

Le système de mesure est constitué d'un capteur (tête de mesure  $\varnothing = 14$  mm, L = 28 mm) et d'un boîtier électronique conditionneur de signal (80\*60\*25 mm) protégé par une enveloppe métallique robuste. La plage de mesure s'étend de  $-40$  à  $+600^\circ\text{C}$ , pour une résolution de 10 :1 (rapport = distance capteur-objet de mesure/ diamètre de l'aire de mesure). La précision de la tête de mesure est de  $\pm 1\%$  ou  $\pm 2,5^\circ\text{C}$ , en gardant la plus élevée des deux valeurs. La précision du boîtier électronique est de  $\pm 0,5\%$  ou  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  selon la plus élevée des deux valeurs. Dans notre cas, pour  $200^\circ\text{C}$  elle est de  $\pm 5^\circ\text{C}$ . L'émissivité est réglable entre 0,100 à 1,100 sur le boîtier électronique par pas de 0,001.

Le capteur est installé au-dessus du four au niveau du hublot supérieur ( $\varnothing = 215$  mm, e = 4 mm). Un trou de diamètre  $\varnothing = 12,5$  mm est prévu dans le hublot afin de fixer le capteur pour éviter l'utilisation d'une fenêtre en quartz, neutre aux infra-rouge (coût très élevé).

La température maximale supportée par le capteur est de  $85^\circ\text{C}$ . Pour assurer son bon fonctionnement, une arrivée d'air ambiant sous faible pression a été installée afin de refroidir la tête de mesure.

L'aire de la surface dont on mesure la température est fonction des caractéristiques du capteur ainsi que de la distance le séparant du produit. Dans notre cas, la surface mesurée est un disque de 3 cm de diamètre, situé en face (à 30 cm) de la tête de mesure, sur la partie gauche de la génoise.

L'émissivité du produit a été déterminée en plaçant une génoise cuite dans le four de cuisson à température ambiante. La température est mesurée à l'aide de thermocouples (type K) placés dans l'air au-dessus du produit et dans la croûte.

La température de surface a été mesurée par le capteur IR en fixant différentes émissivités de 0,83 à 0,98 avec un pas de 0,01. Les valeurs de température interne et dans la croûte sont comparées en recherchant l'émissivité qui minimise l'écart. La valeur ainsi obtenue, supposée constante avec la température, est de 0,87 (Annexe 2).

Nous avons observé que la température de surface mesurée en fixant cette valeur d'émissivité augmente dès les premières 300 secondes de cuisson ce qui provoquerait une coloration rapide de la surface de la génoise. Pour cela nous avons adopté la valeur trouvée de l'émissivité de la génoise cuite pour tout l'essai de cuisson en faisant l'hypothèse que la surface de la génoise crue devient rapidement de la croûte au delà de 300 s de cuisson.

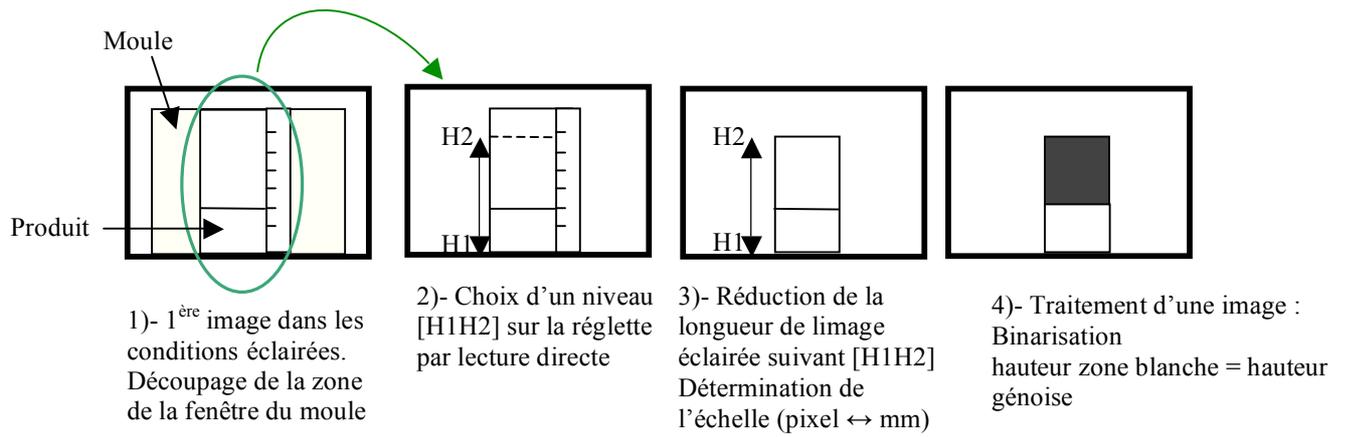


Figure 25 : Etapes de traitement des images prises à travers la fenêtre du moule

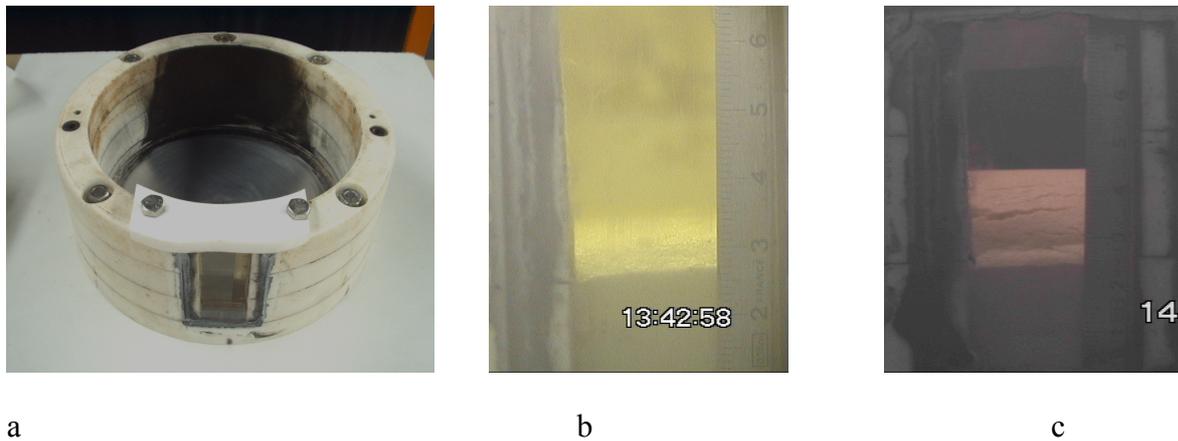


Figure 26 : Obtention des images en cours de cuisson de pâte dans un moule, a) Moule passé au noir de fumée b) Exemple d'image prise dans les conditions initiales c) Résultat de l'augmentation du contraste

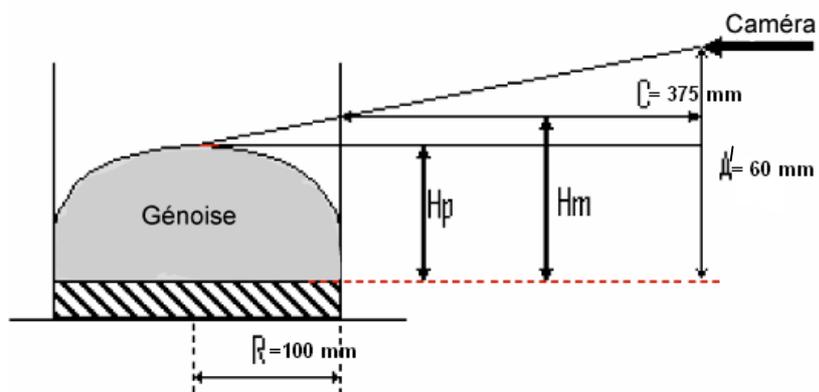


Figure 27 : Schéma de positionnement moule-caméra

#### 2.5.4 Pression interne

La pression interne de la génoise est mesurée à l'aide d'un capteur embarqué (NanoVACQ NVQ/PT-TC, Tmi-Orion, France Figure 24) placé au sein de la pâte. L'outil (diamètre 3,5cm longueur 3,5 cm) est muni d'un capteur de pression de type piézorésistif (30 mbar à 5 bar,  $\pm 5$  mbar) et d'un capteur de température de type Pt100 (0°C à 140°C,  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ). Dans la plage de mesure ou nous travaillons (~1000 mbar) le certificat d'étalonnage indique une erreur de -1 à +2 mbar variable avec la température (Tableau 8). Les deux sondes (température et pression) sont distantes de 14 mm. Préprogrammé, le capteur permet d'enregistrer les informations qui seront lues et exploitées après cuisson par le logiciel xVACQ. La connexion de l'outil au système informatique se fait par liaison RS232.

#### 2.5.5 Gonflement

La pâte augmente de volume au cours de la cuisson :

- Au début, la pâte est régulièrement répartie dans le moule avec une surface supérieure plane. Le niveau de produit apparaît à travers la fenêtre latérale du moule. Ceci permet une lecture directe de la hauteur, sous réserve d'un bon contraste entre la pâte et le fond constitué par la paroi interne du moule.
- Au cours de la cuisson le produit gonfle de façon non uniforme en formant un dôme central plus élevé que les côtés. La pâte colle partiellement à la paroi du moule. Le centre de la génoise est le point le plus élevé du produit, visible à travers la fenêtre du moule.

L'objectif est de suivre l'évolution de la hauteur de produit au cours de la cuisson en se servant de photos prises régulièrement à travers la fenêtre du moule. Leur analyse permet des mesures de la hauteur initiale puis du sommet du dôme tout au long de la cuisson. Un modèle de calcul décrivant la forme sera proposé pour suivre la variation du volume global du produit.

##### *Obtention des images et traitement*

La caméra CDD (FBC-IX47, Sony) est placée devant la porte transparente du four, dans une boîte fermée afin de maîtriser les conditions d'éclairage (sans lumière extérieure). La réglette collée le long de la fenêtre latérale du moule est éclairée avec la lumière blanche d'un néon. La position du moule dans le four a été fixée de façon à ce que la fenêtre (et réglette/pastille associée) soit positionnée face à la caméra. La paroi intérieure du moule faisant face à la caméra a été noircie et la surface du produit éclairée par une fibre optique afin d'améliorer le contraste entre la pâte et le moule. Au cours de la cuisson (de l'ordre de 180 min) les images sont prises régulièrement toutes les 5 minutes. L'image obtenue stockée sur ordinateur montre le produit avec comme fond la paroi interne du moule. Chaque image est traitée en niveaux de gris puis transformée en deux zones (noir, blanc) par segmentation (Figure 25, Figure 26). Après l'essai pour chaque image la hauteur de la partie centrale du produit est ainsi repérée.

##### *Mesure de hauteur du produit*

La hauteur du produit sur chaque image a tout d'abord été mesurée par rapport à **l'échelle de la réglette**. Le mauvais contraste entre le produit et la paroi interne du moule rendait la lecture peu précise ( $\pm 1\text{mm}$ ).

Pour améliorer le contraste la paroi interne du moule a été noircie. Ceci permet de mieux repérer la surface du produit (éclairée par la fibre optique) mais ne permet pas de voir distinctement la réglette sur les images successives. Pour cela la première image après enfournement est traitée séparément, la réglette étant alors éclairée par le néon. Cela permet de repérer une échelle pour les autres images. Dans ce cas la hauteur vue par la caméra (Hm)

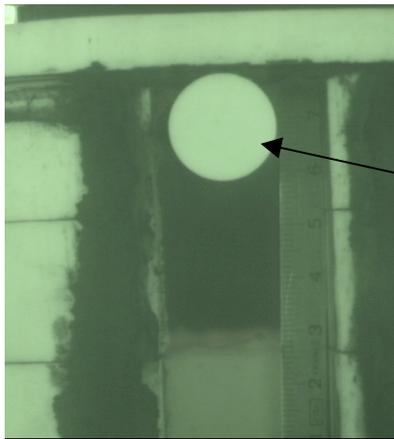
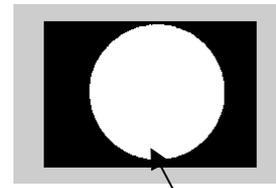


Image en début de cuisson avec lumière



Pastille,  $\varnothing = 18,62$  mm

Pastille binarisée et isolée

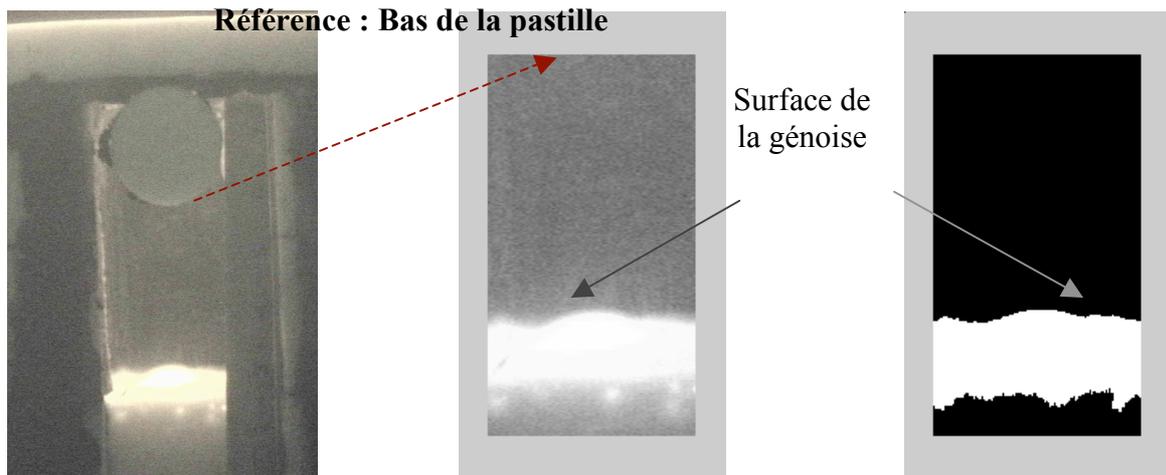


Image en début de cuisson, sans lumière

Image prise en compte par le programme, le haut correspond au bas de la pastille

Même image binarisée

**Figure 28 : Détermination de la hauteur de pâte dans le moule en cours de cuisson : utilisation d'un repère fixe**

doit être traduite en hauteur réelle ( $H_p$ ) en tenant compte de la position de la caméra par rapport au moule (Figure 27) et du rayon interne ( $R$ ) du moule.

$$H_p = \frac{C+R}{C} H_m - \frac{RA'}{C} \quad \text{où} \quad H_p = 1.26 * H_m - 16$$

Pour chaque nouvel essai l'échelle est déterminée à partir de la lecture du niveau initial sur la première image (réglette éclairée) (mm = nombre de pixels). Le moule doit être noirci pour chaque expérience.

Pour faciliter et améliorer la mesure du niveau de produit en cours de cuisson la réglette a été remplacée par **une pastille blanche** (Figure 28) de dimensions connues et fixes ( $\varnothing = 18,62$  mm ;  $e = 2$ mm), collée sur le haut de la fenêtre. Son diamètre connu précisément, sert à estimer sur la première image la correspondance entre mm et pixels. La hauteur du produit est évaluée par rapport au bas de la pastille choisie comme référence. La hauteur peut être ainsi calculée **automatiquement** pour chaque image ( $\pm 0,05$ mm) par repérage du bas de la pastille (point de référence) puis mesure de la distance de la surface de la génoise (au centre) par rapport à ce repère (image binarisée).

*Calcul du volume de la génoise.*

La mesure de hauteur automatique utilisant un repère fixe est performante et nous permet d'obtenir en ligne la hauteur du produit au centre. Cette information est utilisée pour représenter l'évolution du volume du produit au cours de la cuisson. Pour cela, la forme de la génoise est représentée par une base cylindrique fixe surmontée d'une calotte sphérique qui gonfle.

Le volume de la base cylindrique est supposé égal au volume initial de la pâte introduit dans le moule.

$$V_{initial} = H_0 \pi R^2$$

Nous avons utilisé un facteur de correction de la hauteur dans le calcul du volume ( $V_s$ ) de la calotte sphérique.

$$V_s = \frac{\pi(kh)}{6} \times (3R^2 + (kh)^2)$$

$$H(t) = h(t) + H_0$$

Le volume total de la génoise au cours de la cuisson est alors égal à

$$V_{initial} = H_0 \pi R^2 + V_s$$

Le facteur  $k$  est déterminé en identifiant le volume total calculé au volume final, de la génoise cuite, mesuré en utilisant les graines de colza. Un modèle a été développé pour déterminer ce facteur en utilisant la méthode des moindres carrés donnant une valeur de  $k$  égale à 1,48. Ce qui nous permet d'avoir une variation maximale de 6,9% entre le volume calculé et le volume mesuré pour plusieurs essais (cf. §3.2.3). Ce facteur  $k$  est utilisable pour le produit et le moule étudié. Il devra être recalculé pour un autre produit.

## 2.6 Méthodes d'analyses pour le produit avant ou après cuisson

### 2.6.1 Activité de l'eau, $a_w$

L'activité de l'eau d'échantillons de pâte et du produit cuit refroidi (mie prélevée au centre) a été mesurée en utilisant un awmètre (Thermoconstanter TH2, Novasina, Suisse).

L'échantillon remplissant une coupelle en plastique ( $\varnothing = 38$ mm, 10 mm, 11,3 cm<sup>3</sup>), est placé dans l'enceinte de mesure de l'appareil thermostaté à température fixée (25°C) jusqu'à

**Tableau 9 - Teneur en eau des différents ingrédients de la pâte**

Ingrédient	% en masse	Teneur en eau % (base humide)
Farine sèche	31,06	14,2
Sucre sec	31,06	0,16
Blanc d'œuf	16,60	86,28
Jaune d'œuf	14,47	51,9
Eau	6,81	100
<i>Pâte</i>	<i>100</i>	<i>33,4</i>

établissement d'un équilibre entre l'air de la cellule et l'échantillon : l'humidité relative de l'air égale à l' $a_w$  de l'échantillon est donnée par un capteur capacitif.

### 2.6.2 Teneur en eau

La détermination de la teneur en eau des ingrédients, de la pâte, de la mie et de la croûte est effectuée sur des échantillons de produit ( $m_0$ ) de 5 g et 2,5 g pour la croûte, en raison d'une plus faible quantité disponible.

Les échantillons sont pesés dans des coupelles en verre de 5 cm de diamètre et de 2,8 cm de hauteur puis placées à l'étuve à 105°C (Prolabo, Astel S.A., Fr) jusqu'à obtenir un poids constant (environ 24 heures) ( $m_f$ ). La différence de masse observée correspond à la perte en eau.

Le calcul en base sèche (kg eau / kg matière sèche) correspond à

$$X = \frac{m_0 - mf}{mf}$$

La teneur en eau d'un produit est égale à la somme des teneurs en eau de ses constituants multipliée par leur pourcentage massique en MS dans le produit.

Nous avons mesuré la teneur en eau des ingrédients séparément et de la pâte afin de vérifier la cohérence des résultats (Tableau 9).

Lors du traitement thermique le blanc d'œuf mousse ce qui empêche de mesurer sa teneur en eau (débordement du récipient et perte de produit). Pour retrouver la teneur en eau du blanc d'œuf, nous avons mesuré celle d'un œuf entier (battu) soit 76% en base humide ; et celle du jaune d'œuf 51,9% base humide. Connaissant les proportions du blanc (70%) et du jaune (30%) dans les œufs utilisés (par pesée) pour la préparation de la pâte, nous avons retrouvé la teneur en eau du blanc (86,28%).

Si nous considérons 100g de pâte, constituée de :

100g pâte = 31,06g de farine + 31,06g de sucre + 16,60g de blanc + 14,47g de jaune + 6,81g d'eau

Cela correspond en quantité d'eau à :

$(31,06 * 14,2) / 100 + (31,06 * 0,16) / 100 + (16,60 * 86,28) / 100 + (14,47 * 51,9) / 100 + 6,81 = 33,39$  g d'eau/100g pâte (base humide).

Soit une teneur de 33,39 g d'eau par 100 g de pâte (base humide) et 50,15 % en base sèche.

La teneur en eau de la pâte à génoise obtenue par mesure à l'étuve est de 33,4% (base humide). Il faut cependant noter que cette valeur moyenne peut légèrement varier en fonction des œufs utilisés.

### 2.6.3 Capacité thermique et conductivité thermique

Les capacités thermiques de la pâte et de la génoise cuite ont été déterminées par analyse calorimétrique différentielle (DSC Q100, TA instrument) et par mesure indirecte en utilisant un CTmètre (Technical Electronics Photoengraving, Meylan, Fr).

L'analyse calorimétrique différentielle consiste à mesurer la différence de flux de chaleur entre deux creusets (Figure 29), un contenant l'échantillon et un vide, soumis à une même variation de température. Sont mesurées les températures de chacun des creusets en continu au cours du temps. Pour la mesure de  $C_p$ , l'appareil est calibré grâce à la capacité thermique connue d'un saphir.

La capacité thermique des ingrédients (farine, sucre, œuf) préalablement séchés dans une étuve sous vide a été mesurée par DSC en mode modulé avec une rampe de température entre

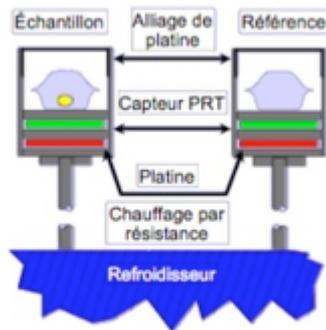


Figure 29 : Schéma de principe du calorimètre différentiel à balayage.

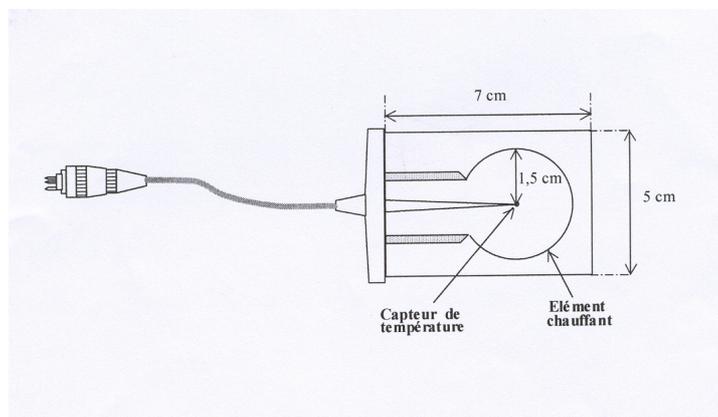


Figure 30 : Sonde utilisée pour la mesure de la conductivité thermique de la pâte et de la génoise cuite (CTmètre)

20°C et 100°C à raison de 1,5°C/min. Trois répétitions ont été effectuées par constituant. La capacité thermique de la génoise cuite et de la pâte ont été mesurés en modulé quasi isotherme à 25°C pendant 10 min. Dans tous les cas des capsules aluminium hermétiques ont été utilisées (35 µl).

Pendant la durée de l'essai, l'écart type entre les valeurs enregistrées pour la pâte est inférieur à 1%.

Le CTmètre permet la mesure des caractéristiques thermiques de matériaux homogènes et isotropes (Rabiey, 2005). Une puissance de chauffe est générée dans le produit à tester et l'élévation de température induite est interprétée en termes de diffusivité, capacité thermique et conductivité thermique sur une période de temps de mesure déterminée.

Il se compose d'éléments insérés dans un circuit imprimé plat et souple (60\*90\*0,2 mm, Figure 30) :

-un élément chauffant en forme d'anneau ( $\varnothing = 30$  mm) de puissance de chauffe contrôlée.

-une sonde de température mesurant la température au centre de l'élément chauffant.

La plaque souple est insérée entre deux éléments plans de l'échantillon à mesurer. La quantité de produit nécessaire étant importante, il est possible de faire la mesure en posant la plaque à la surface du produit (bon contact) et de déposer un matériau isolant sur l'autre côté de la plaque. Le système ainsi constitué est considéré comme une plaque semi-infinie. Les valeurs trouvées seront alors multipliées par 2.

Avant de lancer la mesure, les paramètres suivants sont fixés : la puissance de chauffe (de 0 à 2,5 W), le temps de chauffe, le temps de mesure, le pas de mesure, le rayon de l'élément de chauffe ainsi que la variation de température maximum à tolérer. Le dépassement de cette température engendre l'arrêt de l'essai.

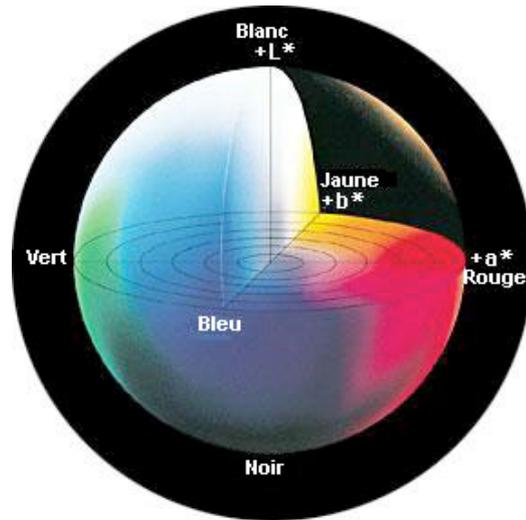
A la fin de l'exécution du programme, un afficheur transmet les résultats, à savoir : la conductivité thermique (0,02 à 5 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> ± 5%), la capacité thermique volumique du matériau (kJ. m<sup>-3</sup>.K<sup>-1</sup> avec une précision de 5%), la température de départ (-20°C à +80°C avec une résolution de 0,025°C), la variation maximum de température et le coefficient d'ajustement (en pourcentage). Ce coefficient permet de vérifier la validité de l'essai : il doit être compris entre 2% et zéro, la valeur optimale étant zéro.

Dans le cas de la pâte, la sonde est posée sur le récipient rempli de pâte à ras bords ( $\varnothing = 12$  cm, H = 14,7 cm). Pour la génoise cuite refroidie nous avons utilisé la moitié (renversée) d'une génoise ( $\varnothing = 20$  cm, H = 6 cm) dont on a enlevé 0,5 cm du fond (structure plus serrée, sèche).

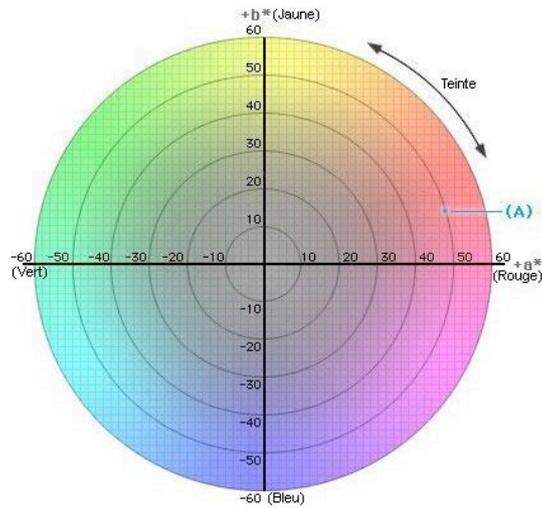
#### **2.6.4 Mesure de la couleur**

Un colorimètre tristimulus (CR-200 Minolta, France) est utilisé pour mesurer (par contact) la couleur de la pâte et de la surface (croûte) de la génoise après cuisson. La surface à caractériser (une zone circulaire  $\varnothing = 8$  mm) est placée sous un éclairage diffus de type D65 (lampe à Xénon Pulsé), normalisé par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). Seule la lumière réfléchiée perpendiculairement à la surface de l'échantillon est récupérée et transformée par des photorécepteurs en signaux électriques qui sont, par la suite, amplifiés et convertis en données numériques. Ces derniers correspondent aux spécifications de couleur de l'échantillon.

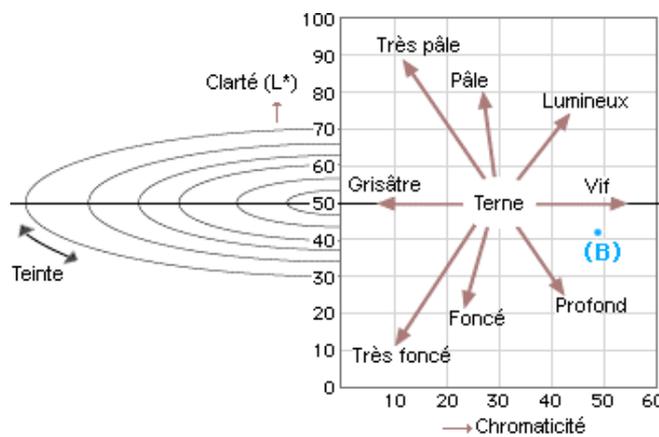
Le résultat obtenu, est donné sous forme de trois coordonnées L, a, b, mathématiquement reliées aux coordonnées x, y et z de l'échelle CIE. L'espace couleur L\*a\*b\* (appelé aussi CIELAB) est actuellement l'un des plus utilisés pour mesurer la couleur des objets dans pratiquement tous les domaines. C'est l'un des espaces couleur uniformes définis par la CIE en



(a)



(b)



(c)

Figure 31 : (a) Solide des couleurs, (b) Plan de coupe du solide des couleur pour L constant, (c) Luminance en fonction de la chromacité (site Minolta Europe)

1976 de façon à réduire l'un des principaux problèmes de l'espace couleur Yxy, à savoir que des distances égales sur le diagramme de chromacité x, y ne représentent pas des différences égales des couleurs perçues.

Dans cet espace couleur,  $L^*$  indique la clarté, tandis que  $a^*$  et  $b^*$  sont les coordonnées de chromacité. La figure 6 montre le diagramme de chromacité  $a^*$ ,  $b^*$ . Dans ce diagramme,  $a^*$  et  $b^*$  indiquent la direction des couleurs :  $+a^*$  va vers le rouge,  $-a^*$  vers le vert,  $+b^*$  vers le jaune, et  $-b^*$  vers le bleu. Le centre du diagramme est achromatique. Au fur et à mesure que les valeurs  $a^*$  et  $b^*$  augmentent, et que l'on s'éloigne du centre, la saturation augmente. La Figure 31 (a) représente le solide des couleurs pour l'espace couleur  $L^*a^*b^*$ ; la Figure 31 (b) représente une coupe horizontale de ce solide à valeur constante  $L^*$ .

La valeur  $L$  représente la luminance sur une échelle de 0 (obscur) à 100 (blanc). Les valeurs de  $a$  et  $b$  varient entre  $-60$  et  $+60$  et donnent la chromaticité de l'échantillon : vert à rouge pour  $a$ ; et bleu à vert pour  $b$ . (Figure 31). Ainsi pour des valeurs  $a^*$  et  $b^*$  ( $a^* = +47,63$ ,  $b^* = +14,12$ ) nous obtenons le point (A), qui donne la chromaticité de l'objet. Si nous faisons maintenant une coupe verticale du solide des couleurs, passant par le point (A) et le centre, nous obtenons une représentation de la chromaticité par rapport à la clarté. Cette représentation donne des informations sur l'aspect pale, sombre terne ou vif du produit. Le chroma,  $C^*$ , appelé aussi indice de saturation indique la saturation de la couleur :

$$C^* = \sqrt{a^2 + b^2}$$

L'appareil est calibré à l'aide d'une plaque blanche fournie avec l'appareil dont les paramètres de couleur sont  $L^* = 97,91$ ,  $a^* = -0,79$ ,  $b^* = 2,05$ .

La couleur de la pâte a été mesurée dans des récipients (5) de formes/tailles différentes :  $2,8 < H < 9,5$  cm ;  $1,8 < \varnothing < 4,1$  cm. En effet, la réflexion de la lumière transmise à la tête de mesure pourrait être influencée par la quantité de produit utilisé.

Pour chacun de ceux-ci, nous avons répété trois mesures, le capteur de mesure étant mis en contact avec la pâte. Dans ces conditions, il n'a pas été observé de différence significative.

La mesure de la couleur de la surface de la génoise après cuisson (entière) a été effectuée en 5 positions différentes de la croûte (Figure 32) (répété trois fois par position à la suite).

Les mesures ont été réalisées pour des génoises cuites à  $160^\circ\text{C}$ ,  $180^\circ\text{C}$  et  $220^\circ\text{C}$  (3 cuissons à chaque température).

### 2.6.5 Texture du produit cuit

Pour évaluer la texture de la génoise cuite, nous avons effectué un test de compression relaxation en utilisant un texturomètre TA.XT2 (Stable Micro Systems, Grande Bretagne). Le choix des essais de compression a été basé sur la non destruction du matériau au contraire de ce qu'un essai de traction aurait pu causer et il correspond plus à la perception sensorielle d'un produit en bouche.

Lors des essais une déformation de 50% (diminution de hauteur de produit) a été imposée. De la courbe force/déplacement on a pu tirer les modules de Young des génoises cuites à différentes températures. Il représente la pente à l'origine de la courbe contrainte/déformation de la première période de compression. Il renseigne sur la rigidité du produit testé.

$$E = \frac{\tau}{\varepsilon_L} \quad \text{où } \tau = \frac{F_A}{A} \quad \text{et } \varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L}$$

$F_A$ , force appliquée (N),  $A$ , surface de l'échantillon ( $\text{mm}^2$ ),  $\Delta L$  allongement,  $L$  longueur initiale de l'échantillon (mm),  $\tau$  contrainte et  $\varepsilon$  déformation. Une fois atteint un déplacement de 50% on enregistre la force maximale à la compression ( $F_{\text{max}}$ ). Le piston est maintenu puis

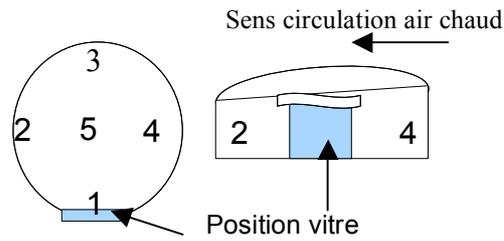


Figure 32 : Position de mesure de la couleur, de l'épaisseur de la croûte et de la mie de la génoise



Figure 33 : Test de compression (TAXT2)

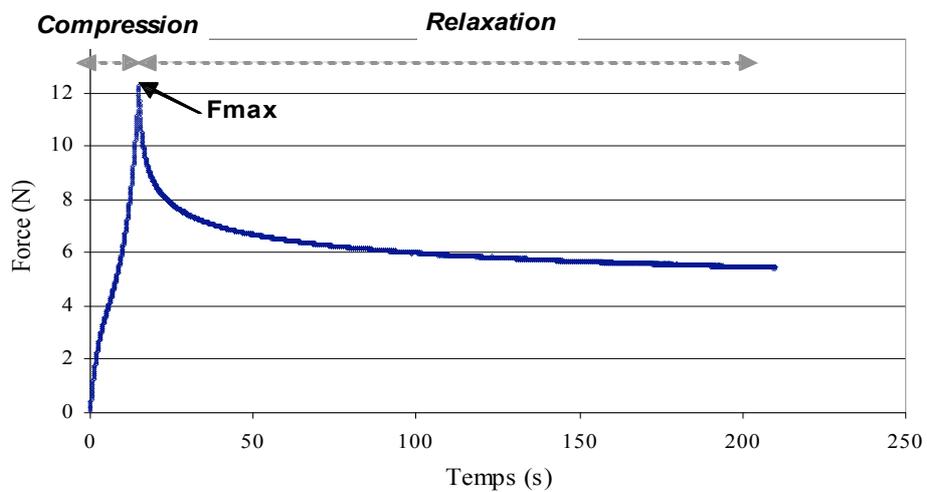


Figure 34 : Essai de compression (50%) relaxation (30min) sur un disque de génoise ( $\phi = 4$  cm,  $H = 3$  cm)

une phase de chute de force commence, reproduisant la tendance du matériau à retrouver son nouvel état d'équilibre : c'est la phase de relaxation. On observera alors deux régimes, un transitoire où la force chutera rapidement jusqu'à atteindre un palier représentant le régime stationnaire ( $F_{\text{final}}$ ). De cette période de relaxation du produit on peut déterminer le taux de relaxation de l'échantillon défini par :

$$\text{Taux de relaxation} = \frac{F_{\text{max}} - F_{\text{final}}}{F_{\text{max}}}$$

$F_{\text{max}}$  : la force maximale enregistrée pendant la compression

$F_{\text{final}}$  : la force enregistrée en fin de relaxation.

Les paramètres,  $F_{\text{max}}$ , Module d'Young et taux de relaxation, contribuent à caractériser la texture du matériau pouvant représenter l'histoire thermique imposée.

Ce test nécessite l'utilisation d'un disque en aluminium (Figure 33), capable de couvrir toute la surface de l'échantillon à analyser. Il permet de comprimer des produits selon un programme où la vitesse et la distance de descente sont définies par l'utilisateur. Pour chacune des cuissons (160°C, 180°C et 220°C) des échantillons cylindriques de mie ont été prélevés au centre de la génoise cuite, à l'aide d'un emporte-pièce en acier inoxydable ( $\phi = 4$  cm,  $H = 3$ cm).

Le programme appliqué est le suivant (Figure 34) :

- Le disque de compression descend avec une vitesse de  $1 \text{ mm.s}^{-1}$  sur une distance de 15 mm.
- Le disque s'immobilise instantanément pendant 30 min, c'est le temps de relaxation.
- Le disque remonte jusqu'à sa position initiale avec une vitesse de  $1 \text{ mm.s}^{-1}$ .

Pendant toute la durée de l'exécution du programme, la force de résistance opposée par le produit (N) est mesurée. Ces mesures sont utilisées pour comparer des produits cuits dans différentes conditions.

### 2.6.6 Images (alvéoles) du produit cuit

Afin d'évaluer la répartition, la densité ainsi que la taille des alvéoles présentes dans la mie de la génoise cuite, nous avons scanné, pour chaque cuisson, une tranche de génoise cuite (épaisseur 1 cm) prélevée au centre du gâteau (Scanner, HP scanjet, 3500C). Nous avons remarqué que la technique de coupe de la génoise est très importante pour ne pas abîmer la structure interne des alvéoles. Pour ce faire, nous avons essayé plusieurs types de couteaux (bien aiguisé de lame régulière, dentés, trancheur, lame de cutter). Nous avons trouvé que la coupe au moyen de la lame de cutter n'écrase pas les cellules internes de la génoise cuite.

### 2.6.7 Volumes initial et final

Le volume initial de la pâte est déterminé à partir de lecture directe sur la règle de la hauteur du produit dans le moule ( $H_0$ ). Le volume est assimilé à un cylindre de hauteur ( $H_0$ ) et de rayon (R).

Le volume de la génoise après cuisson est déterminé sur le produit refroidi dans le moule. Des graines de colza de masse volumique connue ( $\rho = 0,71 \text{ kg. dm}^{-3}$ ) ont été utilisées pour déterminer le volume global. L'espace vide du moule (~34%) est rempli avec les graines, la surface étant arasée avec une règle, délicatement. Le moule est pesé avant et après introduction des graines et le volume de la génoise est donné par :

$$V_{\text{génoise}} = V_{\text{moule à vide}} - V_{\text{graines}} \quad \text{avec} \quad V_{\text{graines}} = m_{\text{graines}} / \rho_{\text{graines}}$$

Cette mesure dépend de l'opérateur. Sa précision est évaluée à  $\pm 0,01 \text{ kg/dm}^3$

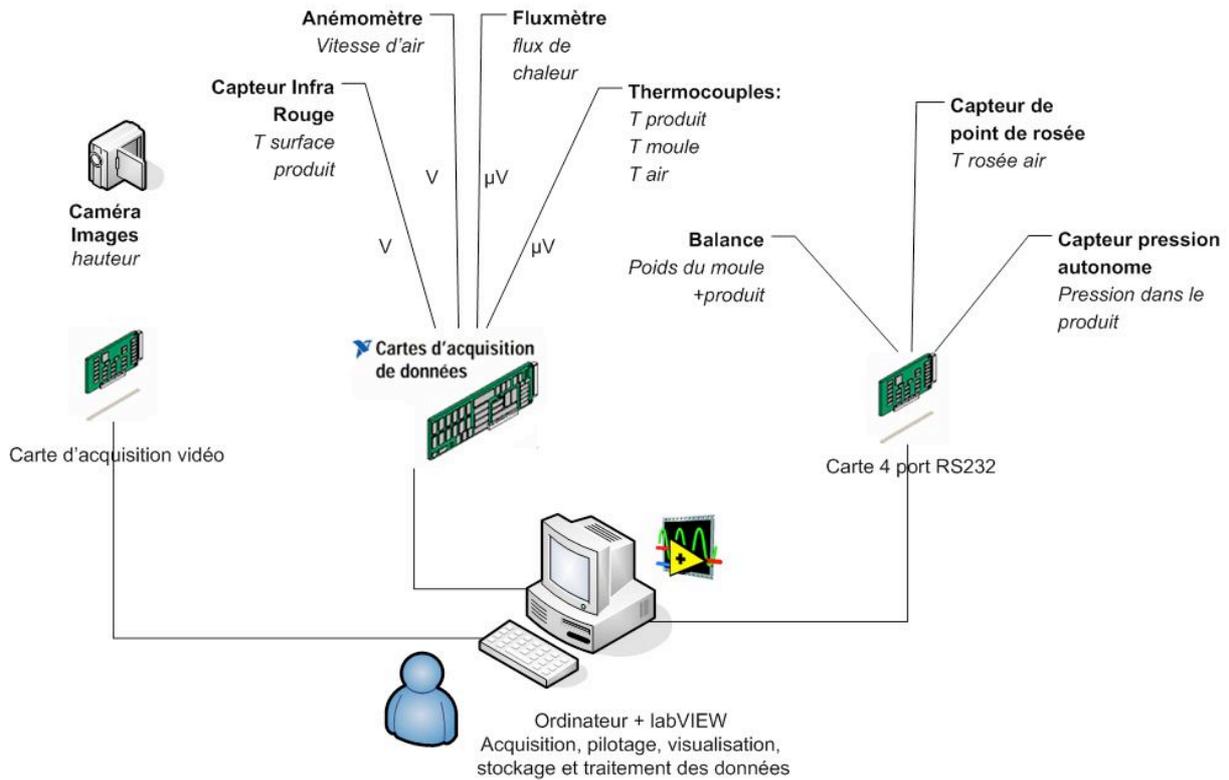


Figure 35 : Schéma général du système d'acquisition.

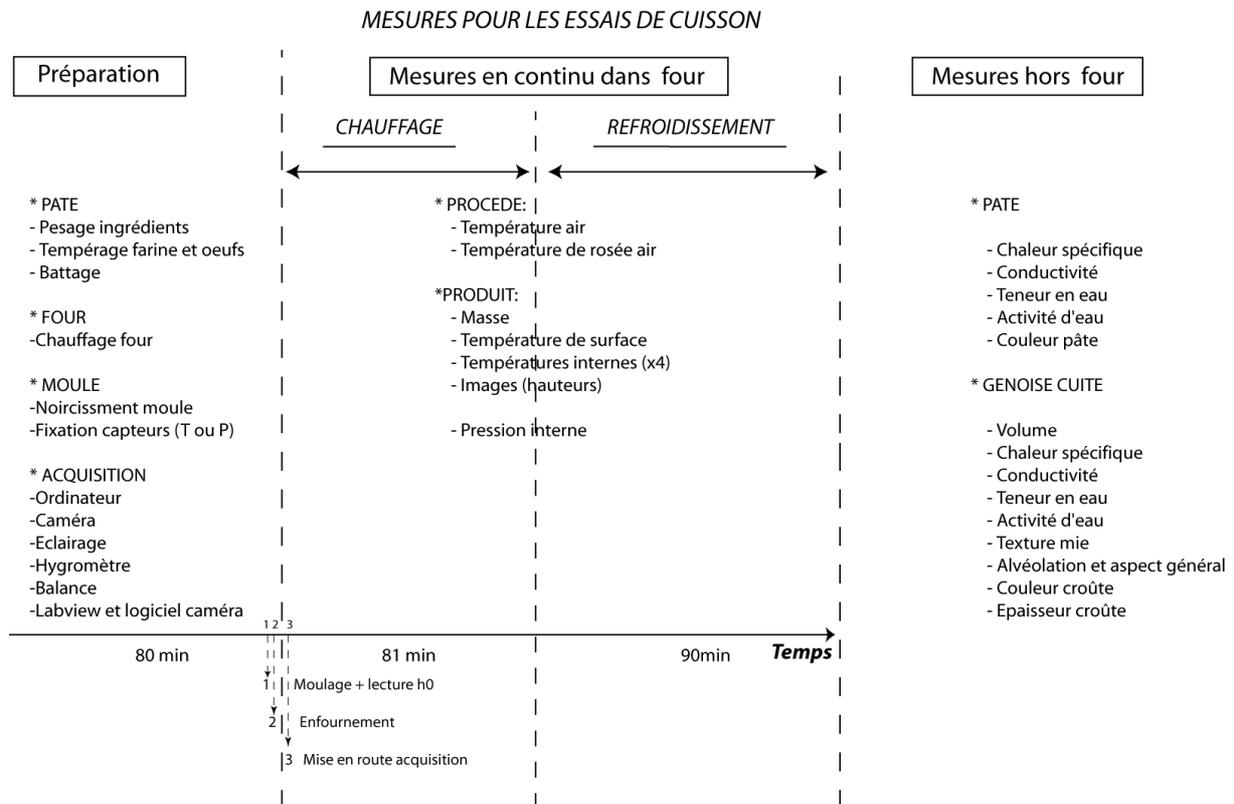


Figure 36 : Etapes de réalisation d'un essai de cuisson d'une génoise à 160°C (81min)

### **2.6.8 Croûte/ mie épaisseur**

Un pied à coulisse ( $\pm 0,01$  mm) est utilisé pour déterminer l'épaisseur de la croûte et de la mie. La mesure a été effectuée en 5 positions du produit cuit et refroidi (Figure 32). La croûte est prise comme étant la partie supérieure du produit cuit pouvant se détacher facilement. Cette mesure a été effectuée pour des génoises cuites à 160°C.

### **2.6.9 Conduite d'un essai de cuisson**

Le four est piloté par un ordinateur (1GHz, 256 Mo, Compact 370, France) avec un logiciel de supervision spécialement créé sous Labview 6.1 (National Instrument, France).

Pendant la cuisson, les températures (produit, moule et air du four) et la vitesse de l'air sont enregistrés par une centrale d'acquisition (National Instrument, modèle PCI 4351) :

Une carte série (PCI RS232) à 4 sorties est reliée à la balance et à l'hygromètre à point de rosée. Les données de pression et les images prises pendant le gonflement sont traitées ultérieurement. Un schéma général est donné sur la Figure 35.

Un grand nombre d'essais ont été menés à une température d'air de 160°C, avec une vitesse d'air fixe correspondant à une fréquence de ventilation de 25Hz. Nous avons travaillé sans ajout de vapeur pendant la cuisson. La durée de cuisson de 81 min à 160°C pour une masse initiale de 700g de pâte, s'explique par le fait que le moule a une paroi latérale isolée, les transferts de chaleur se faisant seulement par le fond et la surface du produit. Après cuisson, la génoise est refroidie dans le four pendant 90 min avec circulation d'air (convection forte) en fixant la température de consigne du four à 20°C (Figure 36).

L'effet de la température de consigne du four sur la cuisson de la génoise est étudié en choisissant les trois températures 160, 180 et 220°C, en répétant chaque essai au minimum trois fois.

Pour ces cuissons, nous avons conservé la même formule, le même moule et la même quantité de pâte initiale, soit 700g.

Le moule chargé de pâte est introduit dans le four préchauffé à la température fixée. Le chauffage de l'air est arrêté après une perte de poids contrôlée (balance) de 6% soit 42 g. De l'air ambiant est alors soufflé dans la cellule de cuisson pendant une durée identique de 90 min.

*Le refroidissement* est effectué dans le four. A la fin de la cuisson, nous diminuons la température de consigne du four à 20°C ce qui provoque l'ouverture de vannes pneumatiques situées à la partie supérieure du four au niveau de la sortie de l'air chaud de la cellule de cuisson. L'air extérieur à température ambiante, est aspiré puis circulé dans le four à vitesse maximale afin d'abaisser rapidement la température de l'air du four jusqu'à la température de consigne fixée pour le refroidissement.

A chaque essai, des mesures avant (couleur, teneur en eau et activité d'eau, conductivité thermique et chaleur spécifique), pendant (température de l'air, températures internes et de surface de la génoise), et après cuisson (couleur, teneur en eau, activité d'eau, conductivité thermique et chaleur spécifique, masse volumique) ont été réalisées.



### **3 RESULTATS ET DISCUSSION**

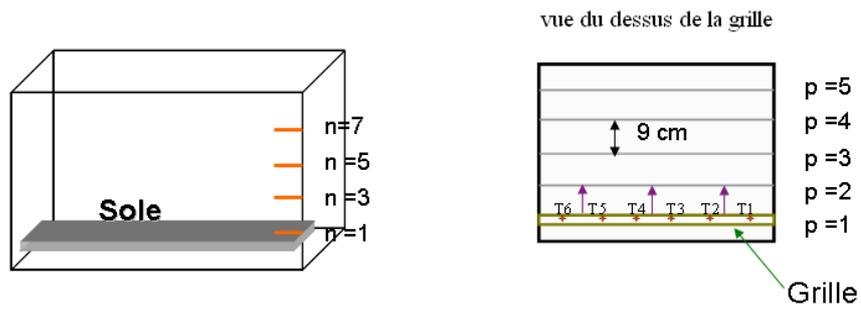


Figure 37 : Les niveaux de mesure des températures dans le four

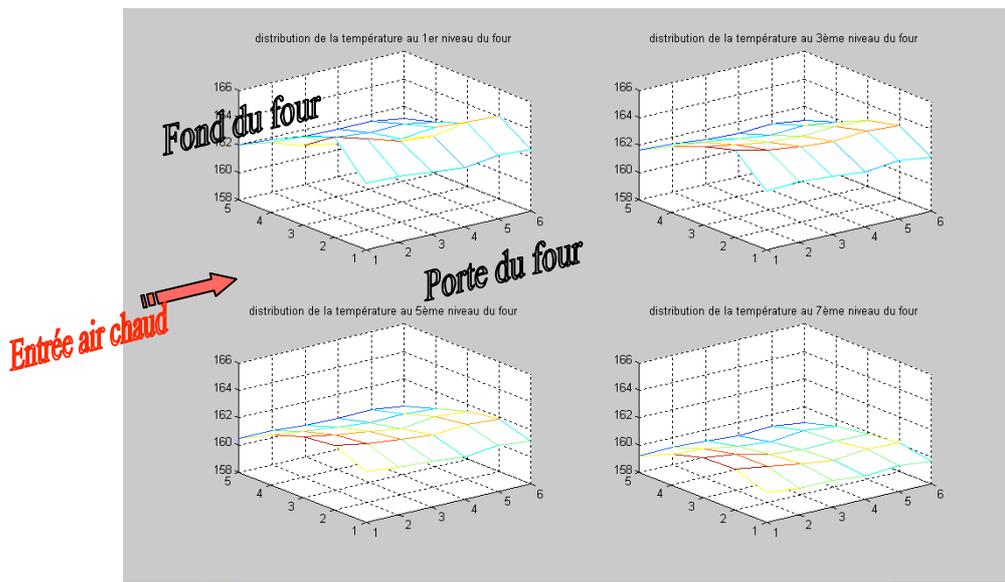


Figure 38 : Cartographie thermique du four aux 4 niveaux du four (160 °C – 3,5 m/s)

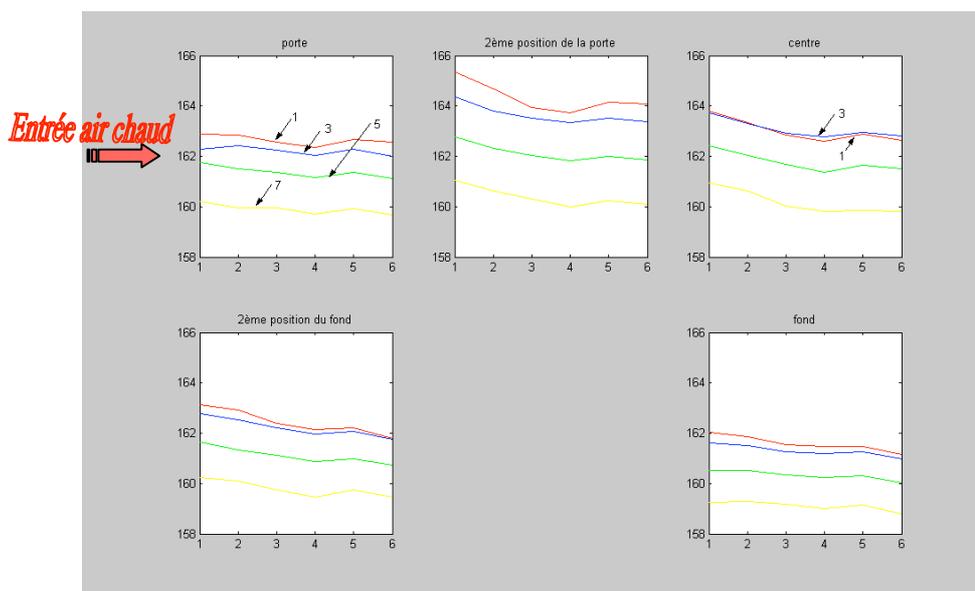


Figure 39 : Profil de température pour chaque plan vertical du four (160 °C – 3,5 m/s)

Ce chapitre comporte 3 parties :

- La caractérisation de l'homogénéité des températures dans le four et en particulier à l'emplacement du moule ; ainsi que la quantification des densités de flux reçues par la surface du produit.
- La description des résultats obtenus pour la cuisson de la génoise, avec un chauffage à 160°C en détaillant l'évolution des caractéristiques du produit (température, gonflement, perte de masse)
- La comparaison de cuissons réalisées à différentes températures de chauffage de l'air 160-180-220°C, prenant en compte l'évolution au cours de l'opération globale de cuisson (chauffage + refroidissement) et l'influence sur les caractéristiques du produit final.

### **3.1 Homogénéité de la température de l'air dans le four et flux de chaleur**

#### **3.1.1 Température de l'air dans le four**

##### **3.1.1.1 Principe**

Pour évaluer la distribution de la température dans la cellule de cuisson, une grille instrumentée avec des thermocouples est déplacée dans le four à différentes positions pour couvrir tout l'espace de la cavité de cuisson.

La cellule de cuisson (560\*550\*270 mm) est composée de 8 niveaux (espacés de 25 mm) au-dessus de la sole sur laquelle repose le moule. La grille utilisée est de forme rectangulaire (54\*54\*0,2 cm) en acier inoxydable perforé (trous de  $\varnothing$  3 mm, espacés de 2 mm). Elle a été instrumentée dans la largeur avec six thermocouples (type K,  $\varnothing$  =1,5 mm, gainé Téflon)) espacés de 10 cm, T'1 à T'6. Après la mesure de la température en une position, cette série de thermocouples a été déplacée sur 5 positions p1 à p5, espacées de 9 cm jusqu'à effectuer la mesure de la température sur tout le niveau ; puis aux quatre niveaux n1, n3, n5, n7 (Figure 37).

Trois séries de mesures ont été effectuées dans le four sans moule, à trois températures de l'air : 150, 160 et 170°C avec une vitesse d'air de 3,5 m/s (correspondant à une fréquence de ventilation de 25 Hz). Chaque mesure de température est répétée 3 fois par niveau et position dans le four ( $3*(4*6*5)$ ) après stabilisation pendant 20 min. Chaque point correspond à la moyenne de 3 mesures de température.

##### **3.1.1.2 Cartographie thermique**

Au niveau des thermocouples T'1, la température plus élevée correspond à l'entrée de l'air dans la chambre de cuisson. Cette température diminue progressivement entre l'entrée et la sortie du four (54 cm), la variation est inférieure à 2°C pour tous les niveaux (Figure 38, Figure 39).

Dans un même niveau, et pour toutes les positions possibles (30) des thermocouples, la différence de température (température moyenne des 3 mesures) ne dépasse pas 1,6°C. L'écart type pour chaque position ne dépasse pas 0,3°C

A 160°C, les températures au niveau 1 proche de la sole du four sont plus élevées de 3 à 4°C par rapport à la température de consigne. Ceci est dû au fait que l'arrivée d'air chaud passe sous la sole. En revanche les températures au niveau 7, proche de la voûte, sont plus faibles de 1 à 2°C en raison d'une mauvaise isolation des parois et à la présence d'une vitre permettant le maintien du capteur IR de mesure de température de surface. Les mesures de températures de surface des parois supérieure et inférieure du four confirment ces données.

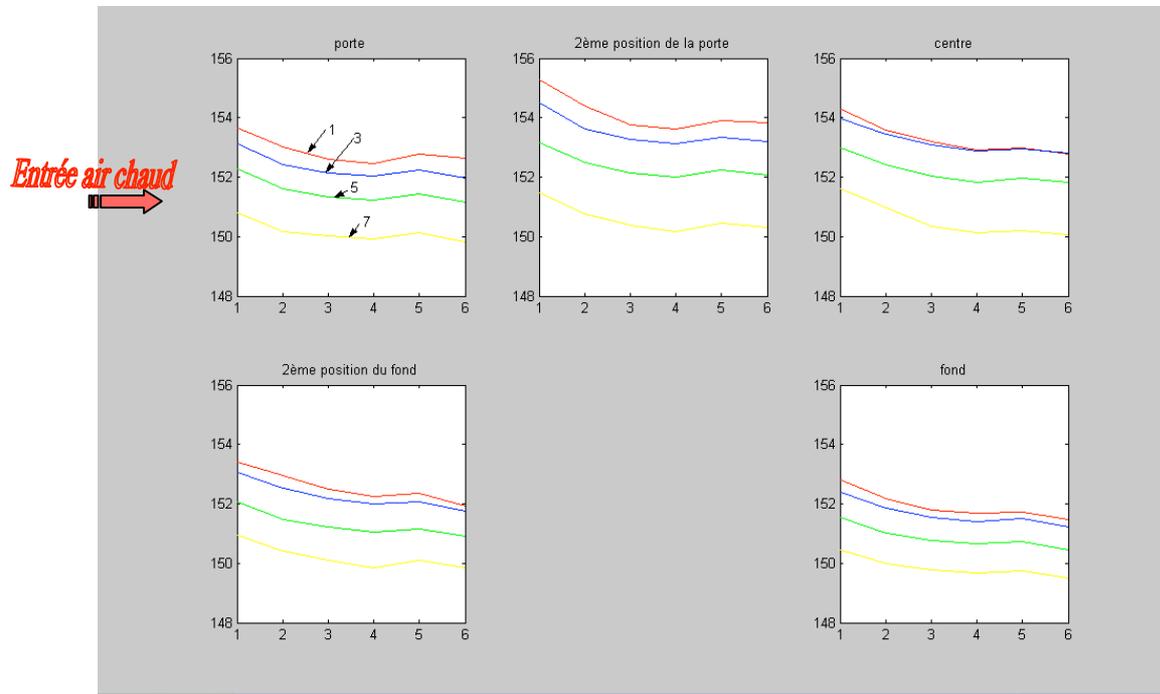


Figure 40 : Profil de température pour chaque plan vertical du four (150 °C – 3,5 m/s)

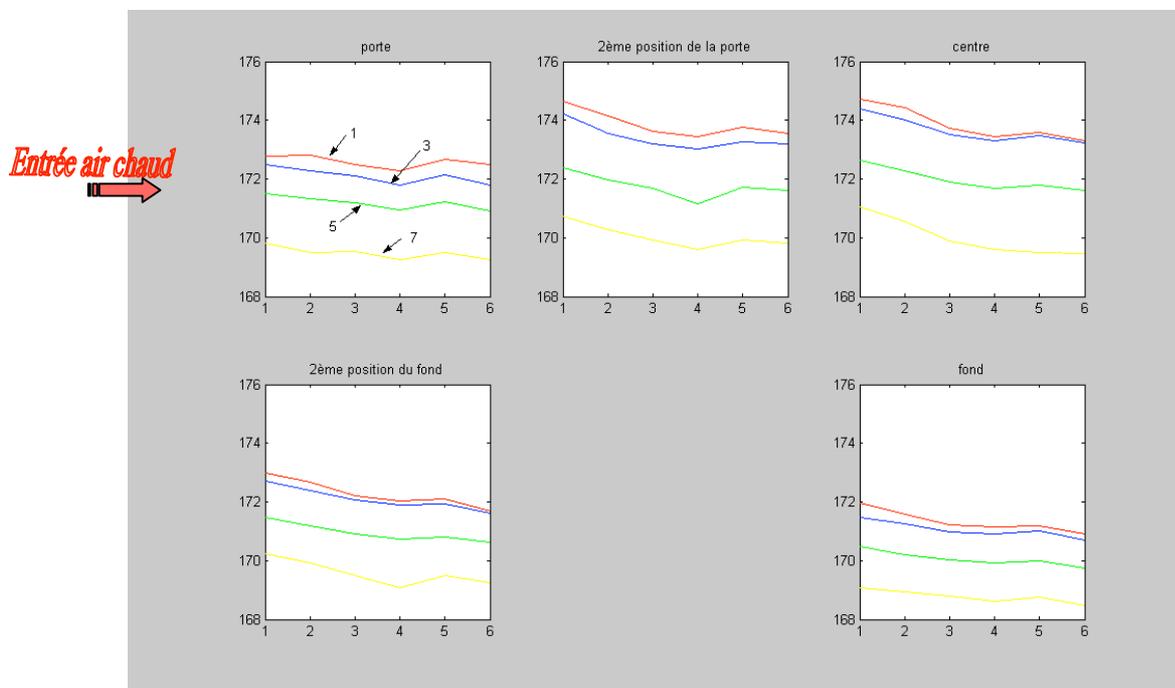


Figure 41 : Profil de température pour chaque plan vertical du four (170 °C – 3,5 m/s)

Les mêmes observations sont valables pour les températures de 150 et 170°C (Figure 41, Figure 41, et annexe 1).

Lors des essais, les cuissons sont réalisées au milieu du plateau, loin de l'entrée de l'air dans le four et de la porte. Dans cette zone centrale, correspondant à la zone de cuisson (niveau n1, positions p2, p3, p4 et thermocouples T'3, T'4) la variation de la température de l'air est inférieure à 2°C (T moyenne 163°C pour la température de consigne 160°C).

Dans la suite de ce travail on considèrera une température d'air homogène et constante dans le volume du four autour de l'emplacement du moule.

### **3.1.2 Flux de chaleur convectif et radiatif**

L'objectif est de quantifier les apports thermiques par radiation et par rayonnement à la surface du produit.

#### **3.1.2.1 Protocole de mesure**

Avant de commencer l'essai, la température du four est stabilisée à la température de consigne (160°C). La température de l'air dans le four est mesurée pendant l'essai à 5 cm au-dessus du moule.

Le moule contenant la plaque en cuivre et les capteurs de flux (à température ambiante) sont introduits dans le four chaud. Les essais ont été effectués dans le moule, sans produit pour éviter de modifier l'ambiance du four par le dégagement de vapeur et une éventuelle condensation sur les capteurs. Les mesures ont été effectuées au centre de la plaque et les deux capteurs latéraux étaient situés soit à droite près de l'entrée de l'air du four (à droite de la porte), ou à gauche près de la sortie d'air de la cellule de cuisson (Figure 22). Nous adopterons les termes à droite et à gauche pour faire référence aux deux positions indiquées précédemment.

L'ouverture de la porte du four pour introduire les capteurs, provoque une légère perturbation de la température de l'air : pendant les premières minutes (10 min) de l'essai, elle dépasse légèrement la température de consigne (10°C) puis se stabilise.

La température de la plaque instrumentée est uniforme et égale à celle des capteurs de flux (faible épaisseur du capteur). Elle augmente régulièrement jusqu'à atteindre la température de l'air dans le four. Les densités de flux enregistrées diminuent jusqu'à s'annuler quand la différence de température entre les capteurs et l'air s'annule (Figure 42).

Au-delà de 8000 s, la différence de température entre la plaque et l'air est trop faible ( $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ ) pour obtenir des mesures de flux exploitables. La plaque doit être refroidie avant de commencer un nouvel essai.

Les essais ont été répétés deux fois par position. Les mesures enregistrées montrent une bonne répétabilité (Tableau 10).

#### **3.1.2.2 Mesure des flux de chaleur**

La surface de capteur peut être chauffée par transfert convectif par l'air chaud additionné d'un transfert radiatif par les parois internes du four.

La densité de flux totale ( $\Phi_t$ ) reçue par radiation et par convection et les transferts de chaleur par convection et par rayonnement sont donnés par les expressions suivantes :

$\Phi_t = \Phi_r + \Phi_c = \text{densité de flux total} = \text{densité de flux radiatif} + \text{densité de flux convectif}$

$\Phi_c = hc (T_{\text{air}} - T_s)$

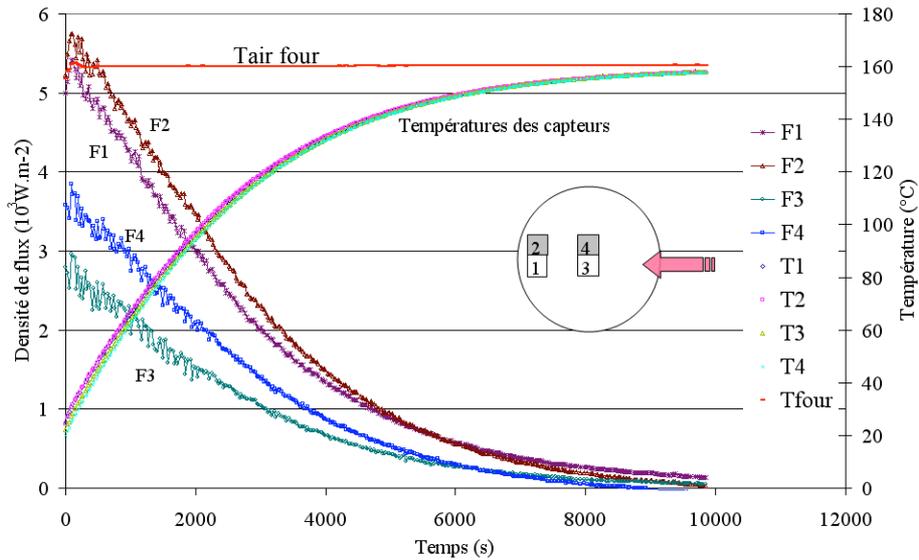


Figure 42 : Densités de flux mesurées par les capteurs brillants et noirs dans les différentes positions (deux répétitions par position)

Tableau 10 - Densités de flux mesurées par les capteurs brillants et noirs dans les différentes positions (deux répétitions par position)

		Densité de flux de chaleur ( $\times 10^3$ W/m <sup>2</sup> )								
		Gauche			Centre			Droite		
Temps (s)		t = 0	t = 2500	t = 4860	t = 0	t = 2500	t = 4860	t = 0	t = 2500	t = 4860
<i>Noir</i>	Essai 1	5,61	2,85	1,13	3,20	1,59	0,57	-	-	-
	Essai 2	5,22	2,81	1,00	3,58	1,73	0,57	-	-	-
	Essai 3	-	-	-	3,63	1,29	0,56	2,14	0,87	0,37
	Essai 4	-	-	-	3,34	1,57	0,54	1,99	1,02	0,35
<i>Brillant</i>	Essai 1	5,02	2,51	1,00	2,40	1,11	0,45	-	-	-
	Essai 2	5,00	2,45	0,93	2,80	1,28	0,46	-	-	-
	Essai 3	-	-	-	2,77	0,90	0,44	1,66	0,53	0,25
	Essai 4	-	-	-	2,45	1,05	0,39	1,45	0,62	0,24

Tableau 11 - Coefficient de transfert de chaleur convectif ( $h_c$ , W/m<sup>2</sup>.°C) et global ( $h$ , W/m<sup>2</sup>.°C) calculés au niveau de différentes positions de la plaque

		Gauche	Centre	Droite
$h$	Essai 1	59,5 ± 1,2	32,5 ± 0,8	-
	Essai 2	59,2 ± 1,9	35,5 ± 0,8	-
	Essai 3	-	31,3 ± 2,1	21,9 ± 1,6
	Essai 4	-	33,1 ± 0,7	23,2 ± 2,8
$h_c$	Essai 1	48,2 ± 0,9	23,6 ± 0,4	-
	Essai 2	47,3 ± 1,1	19,9 ± 0,6	-
	Essai 3	-	18,1 ± 0,7	9,7 ± 0,3
	Essai 4	-	20,7 ± 0,9	10,9 ± 0,4

$$\text{et } \Phi_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot F \cdot (T_r^4 - T_s^4)$$

avec  $T_{air}$ ,  $T_s$  températures de l'air et de la surface de la plaque/capteur ;  $T_r$  température de la paroi ;  $hc$  coefficient de transfert convectif apparent;  $\sigma$  la constante de Boltzmann, et  $\varepsilon$  l'émissivité du matériau (ici  $\varepsilon_{parois}$  du four =  $\varepsilon_{plaque}$ ).

Dans notre cas, la surface des capteurs ( $4 \text{ cm}^2$ ) est très petite par rapport à la surface rayonnante de la voûte ( $3135 \text{ cm}^2$ ) et la paroi au fond du four ( $1539 \text{ cm}^2$ ). Le facteur de vue  $F$  est pris égal à 1. D'après le fabricant, les capteurs noirs N et brillants B ont des émissivités respectivement égales à  $\varepsilon_N = 0,93$  et  $\varepsilon_B = 0,05$ . La densité de flux reçue par la surface de chacun des deux types de capteurs brillant (B) et noir (N) s'exprime alors par :

$$\begin{aligned} \Phi_B &= \Phi_c + \Phi_{r_B} = [hc \times (T_{air} - T_{s_B})] + [\sigma \times \varepsilon_B \times (T_r^4 - T_{s_B}^4)] \\ \Phi_N &= \Phi_c + \Phi_{r_N} = [hc \times (T_{air} - T_{s_N})] + [\sigma \times \varepsilon_N \times (T_r^4 - T_{s_N}^4)] \end{aligned}$$

A partir de ces deux équations on calcule une température de rayonnement équivalente.

$$T_r = \left[ \frac{\left( \Phi_N + (\sigma \times \varepsilon_N \times T_{s_N}^4) - \left[ (\Phi_B + (\sigma \times \varepsilon_N \times T_{s_N}^4)) \times \left( \frac{T_{air} - T_{s_N}}{T_{air} - T_{s_B}} \right) \right] \right)}{\sigma \times \left( \varepsilon_N - \varepsilon_B \times \left( \frac{T_{air} - T_{s_N}}{T_{air} - T_{s_B}} \right) \right)} \right]^{1/4}$$

$$hc = \frac{\Phi_B - (\sigma \times \varepsilon_B \times (T_r^4 - T_{s_B}^4))}{T_{air} - T_{s_B}}$$

Le calcul donne une température de rayonnement de  $155,5^\circ\text{C}$  peu différente de celle mesurée sur la paroi supérieure du four  $153^\circ\text{C}$  (cf. §6, Figure 64). Lorsque l'on considère à  $\varepsilon_N = 1$  et  $\varepsilon_B = 0$ . Le calcul de la température de paroi nous donne une valeur de  $T_r$  égale à  $161,8^\circ\text{C}$ . Il est préférable de prendre en compte les valeurs réelles d'émissivité des capteurs afin de calculer une température de rayonnement équivalente.

L'écart de température entre l'air ( $160^\circ\text{C}$ ) et la surface des capteurs varie. Au centre de la plaque, après 2000 s le flux total est égal à  $2000 \text{ W/m}^2$  et le flux convectif est de  $1500 \text{ W/m}^2$  avec un écart de température de  $70^\circ\text{C}$  entre le capteur et l'air du four. Le flux radiatif est donc de  $500 \text{ W/m}^2$  soit 25% du flux total. (Figure 42)

Au centre de la plaque le coefficient de transfert (Tableau 11) de chaleur par convection calculé, est ainsi de  $21 \pm 3 \text{ W.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$  (bruit de mesure).

Sato et al (1978) définissent un coefficient de transfert radiatif  $hr$  calculé en fonction de la température de l'air  $T_{air}$  et de la température de surface du capteur :

$$hr = \sigma \times \varepsilon \times (T_{air} + T_s) \times (T_{air}^2 + T_s^2)$$

Et un coefficient de transfert global est calculé en additionnant le coefficient de transfert convectif et radiatif.

Nous avons représenté dans le Tableau 11 la moyenne du coefficient global pendant la durée de cuisson (81 min). Au centre de la plaque, il est égal à  $33,1 \pm 1,5 \text{ W.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$ .

### 3.1.2.3 Flux de chaleur mesurés par les capteurs latéraux

Compte tenu de l'aérodynamisme dans la cellule de cuisson, les mesures de densités de flux sont plus importantes à gauche et plus faibles à droite : la densité de flux total reçue à gauche est égale à trois fois celle reçue à droite du moule, et deux fois celle reçue au centre. En effet, l'air circule perpendiculairement à la paroi droite du moule et parallèlement à sa surface



supérieure. Ensuite, il atteint la paroi interne gauche du moule créant une grande turbulence locale à gauche de la surface du produit.

La vitesse de l'air est plus faible à droite de la plaque à l'intérieur du moule, correspondant à un coefficient de transfert par convection plus faible et égal à la moitié de celui calculé au centre.

La part du transfert radiatif a été calculée pour les différentes positions, gauche, centre et droite, par rapport au flux total enregistré par le capteur noir (flux total). Nous avons trouvé respectivement, 13%, 28% et 39%. Lors de cuissons réelles, on devrait observer un gonflement et une couleur de surface non homogène pour le produit : plus coloré et plus développé à droite, du côté de l'arrivée de l'air.

### **3.1.3 Conclusion**

Cette étude a permis de vérifier la fiabilité des mesures de température et de vitesse d'air dans le four pour une valeur de consigne donnée. Nous avons pu déterminer une zone de cuisson optimale dans la cellule de cuisson.

L'étude des flux nous a renseigné sur l'apport thermique dans le four : la contribution de la radiation et de la convection dans le four, la quantification des densités de flux reçues par la surface du produit dans le moule ainsi que l'évaluation des coefficients de transfert de chaleur.

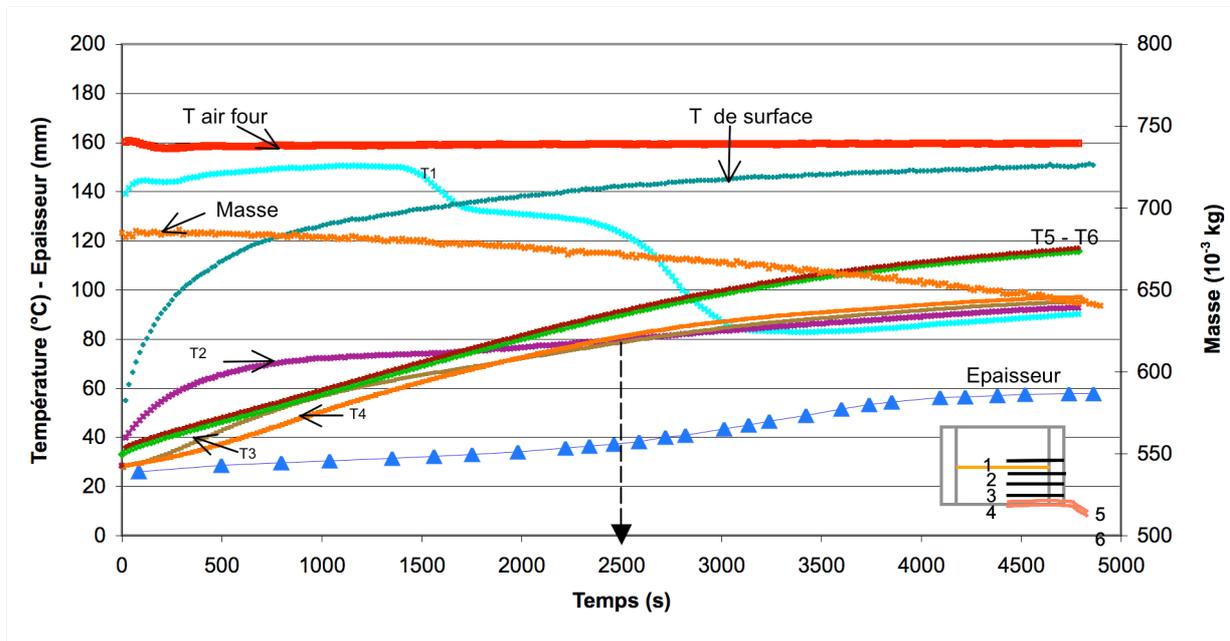


Figure 43 : Evolution des températures (ambiance ; interne et surface produit ; fond du moule), de la masse et de l'épaisseur en cours de cuisson de génoise (160 °C, 3,5 m/s)

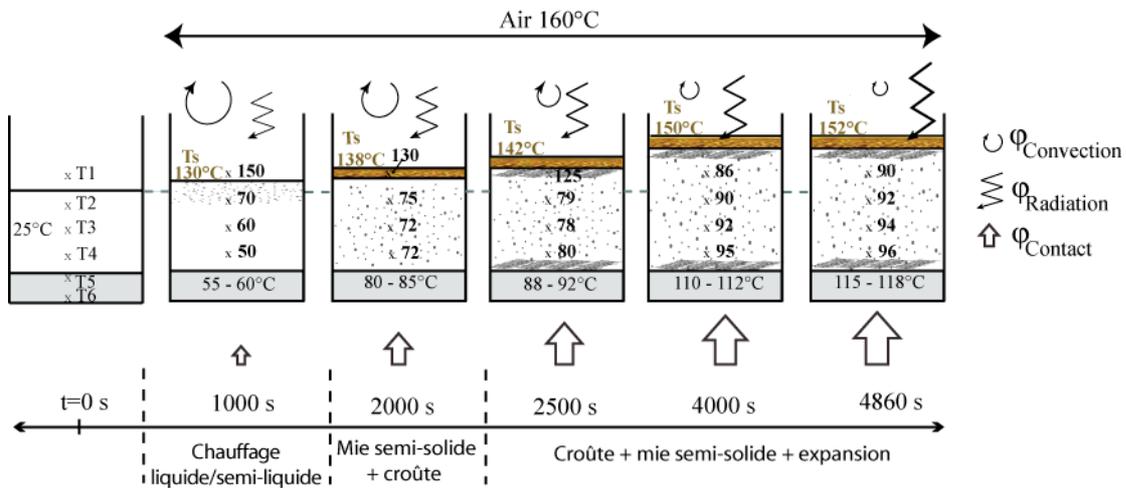


Figure 44 : Représentation des températures, de la structure du produit et des flux de chaleur vus par le produit

## 3.2 Cuisson de la génoise à 160°C

L'étude a été menée à trois températures 160-180-220°C, avec une vitesse d'air constante de 3,5m/s. Le chauffage a été arrêté après une perte de masse du produit, identique pour les trois températures (6%), et suivi d'un refroidissement du produit dans le four avec soufflage d'air non chauffé (90 min). Ces conditions correspondent à une génoise cuite avec une structure, un aspect et un goût acceptables pour le consommateur.

Dans ce chapitre 3.2, les résultats expérimentaux sont discutés en détails pour les essais à 160°C, en ce qui concerne les profils de température dans le produit, puis la variation de densité en cours de cuisson. Toutes les mesures seront ensuite commentées et comparées (chauffage + refroidissement) pour les trois températures dans le chapitre suivant 3.3.

### 3.2.1 Profils de températures

Les différentes données enregistrées pendant un essai sont représentées Figure 43 et Figure 44 : température de l'air dans le four; masse et températures (Ts, T1, T2, T3, T4) du produit; températures de fond de moule (T5, T6). Les observations sont faites à partir d'essais répétés au minimum 5 fois.

Le moule rempli à température ambiante est introduit dans le four préchauffé. La température de l'air mesurée dans la cellule de cuisson à la sortie de l'air, est stable à 160°C (T7). A cette température la durée du chauffage est de 4860 s et le refroidissement de 5400 s.

Le fond du moule, initialement à température ambiante, est chauffé par contact par la plaque sur lequel il repose (reliée à la balance). Les températures au fond du moule T5, T6 sont à 55-65°C après 1000 s, et restent inférieures à 100°C jusqu'à 3000 s. Elles augmentent régulièrement jusqu'à 116°C-118°C en fin de cuisson. Ceci explique les températures correspondantes au fond de la pâte T4, qui sont respectivement de 50 et 85°C pour atteindre 96°C en fin de cuisson. Contrairement à la cuisson de pain ou d'autres biscuits, la température de la pâte (fond et mie humide) n'atteint pas 100°C (Sommier et al, 2005; Li & Walker, 1996) dans le cas où l'air est à 160°C.

Le comportement en surface est différent. La température de surface du produit, mesurée par le capteur IR, atteint 100°C en moins de 300s, puis 130°C après 1000s. Ceci est dû à la combinaison du transfert par rayonnement et la forte convection de l'air au-dessus de la surface du produit.

Le thermocouple T1 situé initialement au-dessus de la surface (+ 1cm) indique une température qui augmente de 140 à 150°C en 1400 s. Ces températures donnent une image de celle de l'atmosphère (160°C) circulant au-dessus de la surface du produit.

Après 1400 s le thermocouple T1 entre en contact avec le produit en expansion, le gonflement de la pâte correspondant une augmentation de hauteur de 1cm. Puis T1 décroît lorsque le thermocouple se trouve dans le produit sous la surface : elle atteint un plateau à 130°C correspondant à la période où le thermocouple est dans la partie constituant la croûte (1750-2100 s). Puis T1 décroît parce que le thermocouple s'éloigne de la surface (le gonflement continue) : la température suit la variation des températures plus faibles de la mie humide.

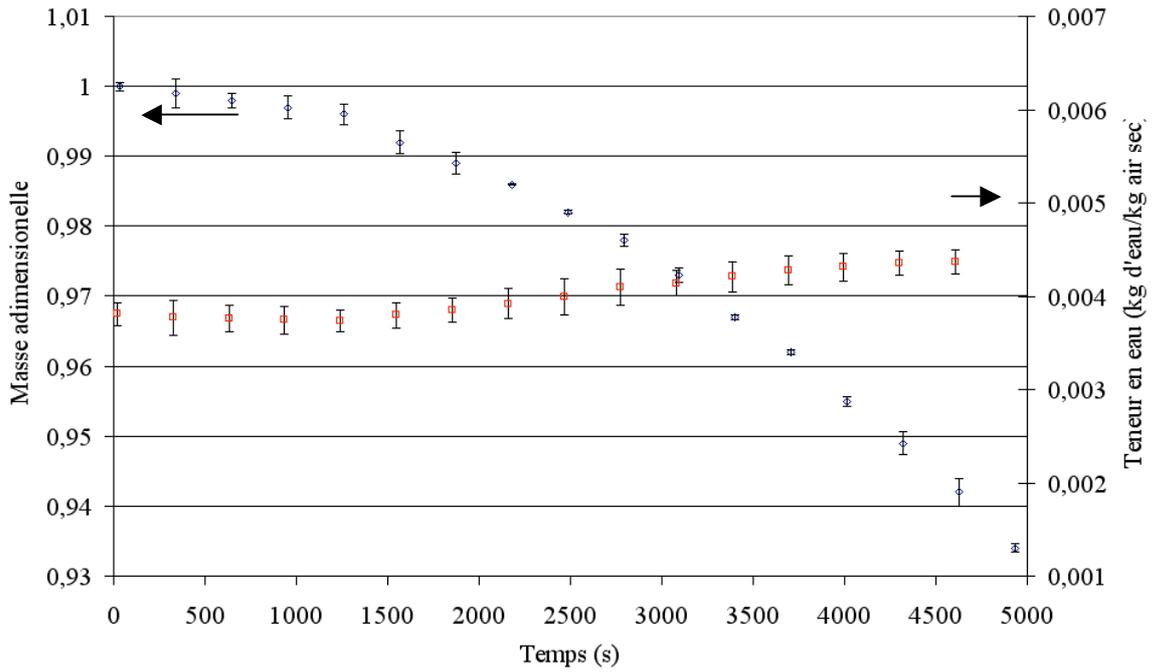


Figure 45 : Répétabilité de la cinétique de perte en masse de la génoise validée sur 3 essais de cuisson. Four (160 °C – 3,5 m/s)

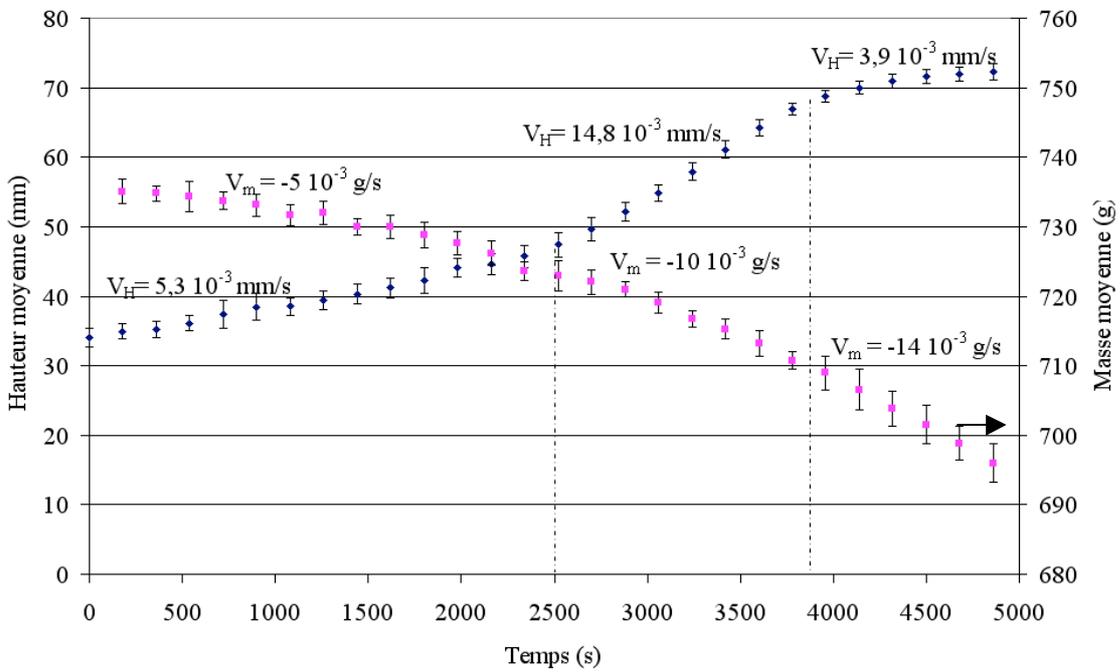


Figure 46 : Epaisseur de produit et perte en masse (moyenne sur 3 essais 160 °C - 3,5 m/s)

Initialement la température T2 est mesurée dans la pâte semi-liquide, sous et près de la surface du produit. Après 600 s, T2 augmente jusqu'à atteindre 65-75°C, domaine de températures correspondant à des réactions de début de dénaturation des protéines, de gélatinisation de l'amidon, et de coagulation du gluten (Lostie et al, 2002). Ensuite le thermocouple 2 se trouve dans un milieu fait de mie pour laquelle les températures augmentent régulièrement 78-80°C pour 2500 s et 90-94°C à 4860 s.

Les mesures de température près de la surface sont assez élevées pour justifier la formation rapide d'une zone plus sèche, qui donnera finalement une croûte colorée.

Le transfert de chaleur en début de chauffage se fait principalement à travers la surface chauffée par convection de l'air chaud et par rayonnement des parois du four. Le transfert par contact par le fond du moule se développe au cours de la cuisson, avec l'augmentation progressive de la température du fond du moule.

### **3.2.2 Cinétiques de perte de masse et variation de l'humidité relative de l'air**

Durant les premières 1000 s, la cinétique de perte de masse est faible (monté en température du produit, Figure 45, Figure 46) ce qui correspond à la perte d'eau par la surface portée rapidement à haute température, 120°C après 1200 s. Puis il y a diffusion d'eau de l'intérieur vers l'extérieur à travers la mie et la croûte en formation. Après 1000 s, la perte en eau est quasi linéaire. Les vitesses apparentes moyennes de perte de masse calculées sont de  $5 \cdot 10^{-3}$  à  $14 \cdot 10^{-3}$  g eau/s.g matière sèche, respectivement pour les deux périodes principales de 1000 à 2500 s puis jusqu'à 4860 s.

La plus grande vitesse de perte de masse est observée en même temps qu'une plus grande expansion quand la structure est modifiée (coagulation des protéines et gélatinisation de l'amidon, Figure 46).

Pendant la durée du procédé (81 min) la teneur en eau de l'air augmente, de 3,8 à 4,4 g eau/kg air sec, principalement après 1800 s jusqu'à la fin (Figure 45). Ce point critique correspond à des températures dans le produit voisines de 70°C. Le four n'est pas complètement étanche et la variation de teneur en eau mesurée n'est pas assez précise pour la relier directement à la perte de poids.

La teneur en eau initiale de la pâte est de  $50,15 \pm 0,13\%$  (base sèche). Si on suppose que la perte de masse totale du produit est due à la perte d'eau, il est possible de calculer une teneur en eau « moyenne » finale du produit de 38,5%. Mais il est difficile de confirmer ce point car la génoise est constituée d'une mie encore humide d'activité de l'eau proche de celle de la pâte initiale et d'une croûte relativement sèche.

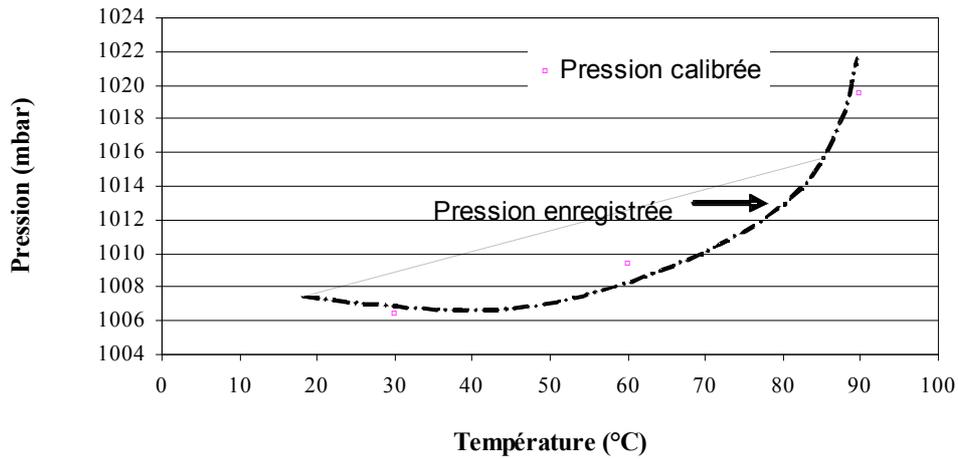


Figure 47 : Comparaison entre la pression mesurée (capteur TMI Orion) et la pression corrigée par étalonnage pour la génoise (160 °C – 3,5 m/s)

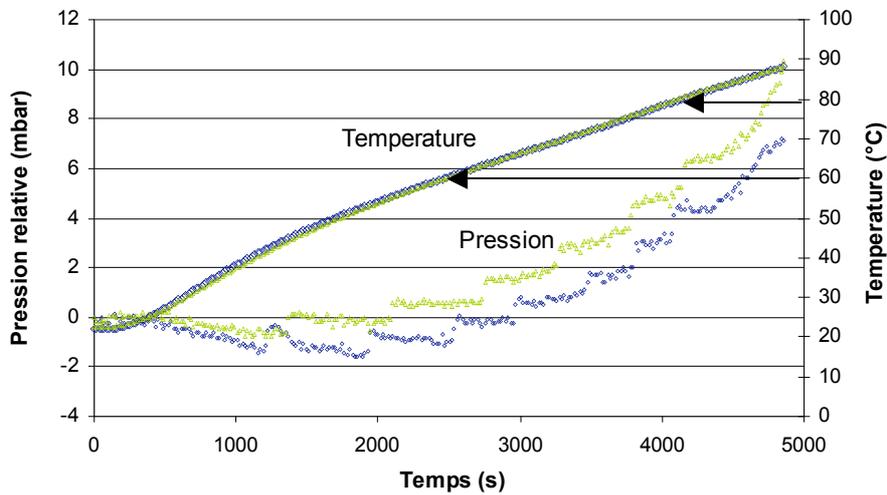


Figure 48 : Pression et température mesurées dans la pâte en cours de cuisson par le capteur autonome TMI Orion (160 °C - 3.5 m/s)

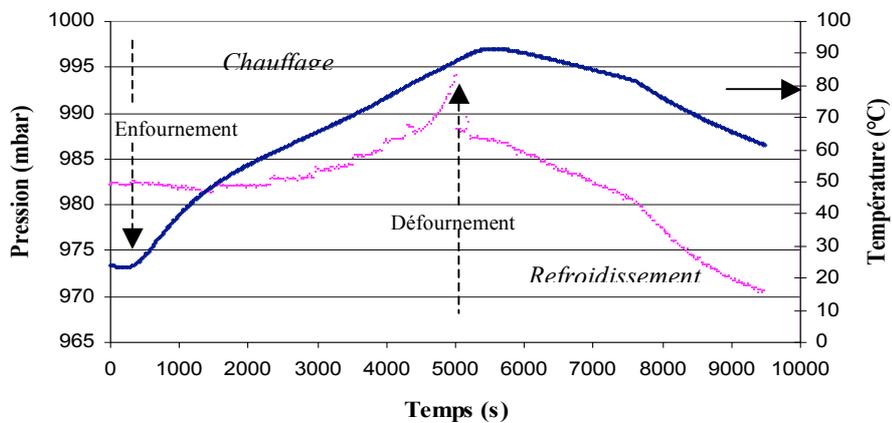


Figure 49 : Suivi de la pression et de la température interne pendant la cuisson (chauffage et refroidissement après défournement et refroidissement à température ambiante) de la génoise (160 °C - 3,5 m/s)

### 3.2.3 Gonflement et pression interne

Le suivi de la variation de hauteur pour 3 essais montre une bonne reproductibilité (Figure 46). La hauteur augmente dès le début du chauffage (0,005 mm/s), puis l'augmentation devient plus rapide entre 2500 s et 3800 s (0,015 mm/s) correspondant à une température entre 78 et 90°C. Cette plage de température correspond au domaine de la gélatinisation de l'amidon et de la coagulation des protéines. Après 4000 s, la hauteur de produit atteint un plateau avec une température moyenne dans la mie voisine de 90°C. Cela correspond à une structure stable de la mie, tandis que la perte de masse (eau) continue.

L'épaisseur initiale (34 mm) est multipliée par un facteur d'environ 2 (entre 1,9 et 2,1) à la fin du chauffage (~72 mm). Avec le moule utilisé, il n'est pas observé d'effondrement pendant la période de chauffage, comme dans d'autres études sur la cuisson de génoise (Lostie et al, 2002), de pain (Sommier et al, 2005 ; Sommier et Douiri, 2006) ou de biscuit (Chevallier et al, 2002).

Les mesures de pression nécessitent un volume initial de pâte plus important pour recouvrir complètement le capteur : 4 cm au lieu de 3,4 cm. Cependant la comparaison peut être faite avec les essais classiques en considérant les températures à l'intérieur du produit associées aux mesures de pression interne.

Aux faibles températures (30°C), la pression mesurée est légèrement surestimée (1 mbar), et aux températures moyennes (60°C) elle est sous-estimée ; enfin aux hautes températures (90°C) elle est surestimée par rapport à la température de calibration (Figure 47).

En tenant compte de la précision du capteur, la pression interne augmente lentement avec une variation de 5 à 6 mbar entre des températures pour la pâte de 60°C et 75-80°C (Figure 48, Figure 47) (Sommier et al, 2002). Après 80°C la pression augmente plus rapidement : cette température de « 80°C » dans le produit correspond à la durée de chauffage de 2500s pour un essai classique à 160°C, quand l'expansion devient plus importante.

Quand la température dans la pâte est inférieure à 60°C, la phase continue de la pâte présente une faible résistance à la déformation avec présence de très petites alvéoles. Puis la pression augmente avec l'augmentation de température, correspondant à des réactions biochimiques créant une structure plus rigide (protéines, gluten, amidon), capable de se déformer et de gonfler. Dans le cas de la génoise les alvéoles petites et régulières dans la pâte initiale, restent petites dans la mie. Les plus grosses alvéoles sont principalement observées juste sous la croûte dans le produit final, là où le chauffage a été le plus intense, avec des températures élevées, en particulier dans la seconde période après 2500s. Sans agent levant dans la recette, les alvéoles sont remplies essentiellement avec l'air introduit pendant la préparation de la pâte et la vapeur d'eau, qui ensemble contribuent à l'expansion thermique du produit (Dunn et White, 1939 ; Matz, 1972 ; Pylar, 1973 ; Baik et al, 2002 ; Sommier et al, 2002).

Le capteur peut être utilisé pour suivre l'évolution conjointe de la pression et de la température dans le produit lors de son refroidissement (Figure 46).

### 3.2.4 Variation de masse, hauteur/volume et masse volumique

La masse volumique est calculée pour chaque temps d'acquisition comme le rapport de la masse mesurée au volume déduit des mesures de hauteur (Figure 46, Figure 50). Le calcul des masses volumiques à partir des images a été validé par des mesures classiques sur le produit avant et après cuisson (Tableau 12). L'erreur faite sur la pâte initiale est faible car les images sont de bonne qualité avec un bon contraste. La différence moyenne est de 2% pour la valeur initiale et de 5% pour la valeur finale. Ce calcul par analyse d'images tient compte de la forme finale du produit semblable à un dôme.

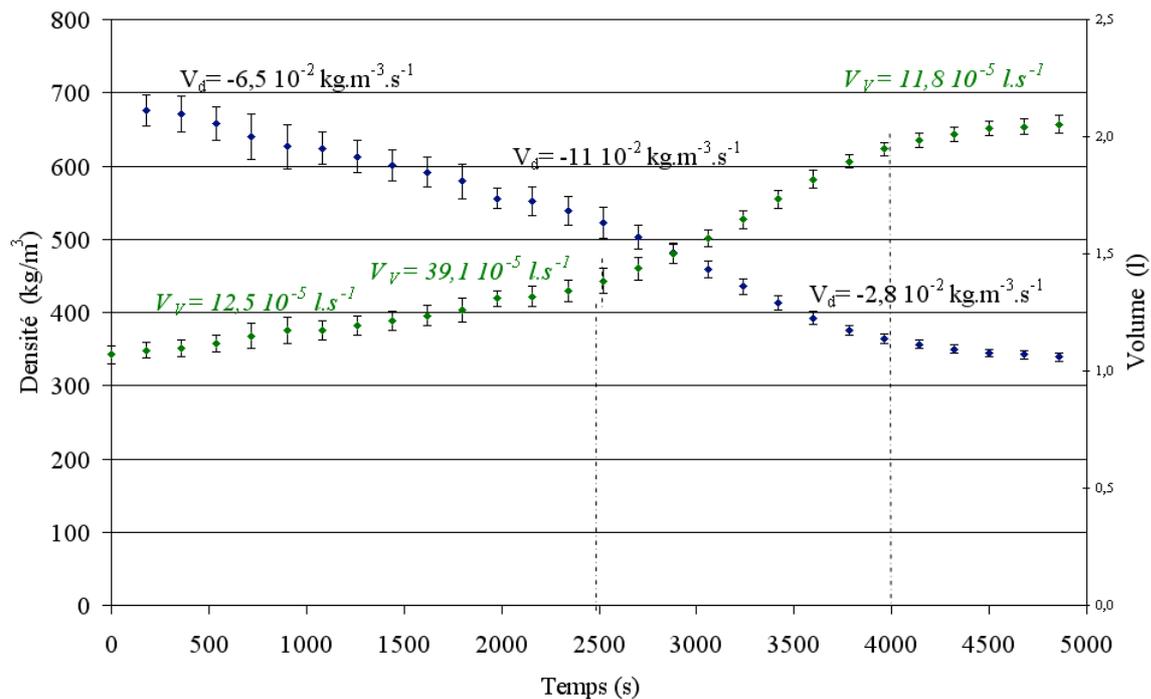


Figure 50 : Evolution du volume et de la masse volumique (moyenne sur 3 essais 160 °C - 3,5 m/s)

Tableau 12 - Comparaison des masses volumiques pendant la cuisson, mesurées et calculées (traitement d'images, 160 °C - 3,5 m/s)

Initial ( $\text{kg/m}^3$ )			Masse volumique du produit final ( $\text{kg/m}^3$ )			
Mesuré	Calculé	erreur %	Fin du chauffage calculé	Après refroidissement		
				mesuré	calculé	erreur %
680	679	0.1	336	385	394	2,5
680	664	2.3	340	423	404	4,3
676	673	0.4	333	383	370	3,4

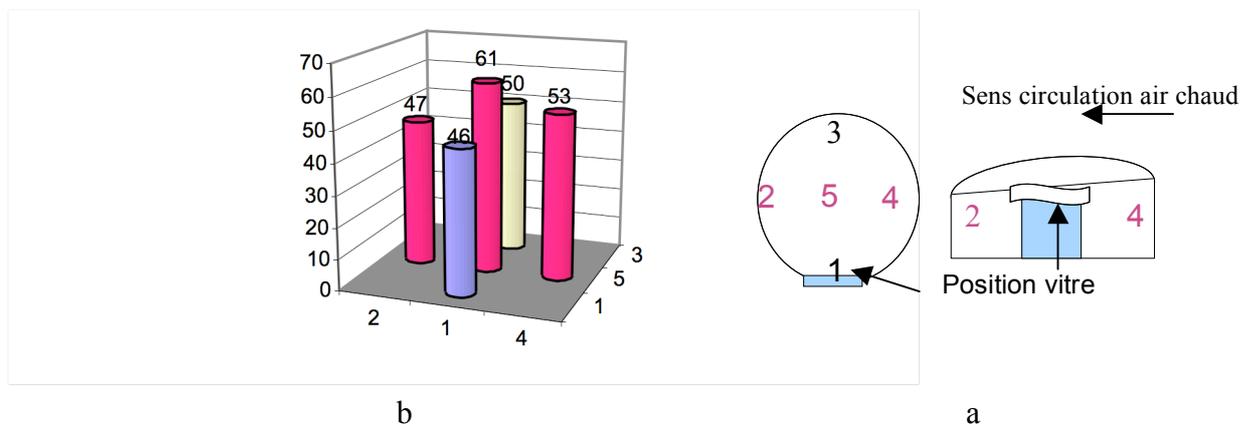


Figure 51 : a) Points de mesure de la hauteur – b) Moyenne des hauteurs mesurées à 5 positions de la génoise

L'évolution de la masse volumique en cours de cuisson est liée d'une part à la perte en eau (masse) et à la manière dont cette eau est perdue ; et d'autre part au gonflement lié au changement de structure et à la formation de la croûte à la surface.

Pendant toute la durée du chauffage de la génoise, 81 min à 160°C, la perte de masse est de 6% de la masse initiale (base humide). La variation de masse présente différentes phases, lente puis plus rapide après 2500 s quand la structure est plus rigide. Au début l'eau libre s'évapore par la surface de la pâte semi-liquide, puis une fine pellicule sèche se forme rapidement, à cause de la température élevée en surface (110°C à 500 s). Ceci limite la perte de masse et correspond à une faible variation de volume, résultant en une faible variation de masse volumique.

Pendant la deuxième période entre 2500 et 3500 s, l'expansion est accélérée, correspondant à une certaine homogénéité des températures dans la pâte, en même temps que leur augmentation progressive : la vitesse d'évaporation est constante avec formation de la mie. Cela se traduit par une forte élévation de la masse volumique.

Au-delà de 3500 s la croûte est plus rigide et plus épaisse, limitant mécaniquement l'expansion et tendant à réduire la perte de masse, cela se traduit également par une forte augmentation de pression interne (Figure 48).

La masse volumique est divisée par 2 (de ~700 à 350 kg/m<sup>3</sup>) après chauffage, et 1,75 si on considère la masse volumique après refroidissement (+ 90 min). Ceci sera commenté dans le chapitre suivant traitant des cuissons à différentes températures.

### **3.2.5 Relation entre flux de chaleur et gonflement**

Pendant la cuisson, le produit ne gonfle pas de manière uniforme. A la fin de la cuisson à 160°C le produit est plus gonflé du côté de l'entrée de l'air dans le four (Figure 51). La différence de hauteur entre les positions 1 et 3 est de 4 mm. La fenêtre du moule, située à la position 1, favorise un transfert de chaleur plus important que la paroi isolante en téflon de la position 3 ce qui favorise un durcissement plus rapide du produit. Cela pourrait être modifié avec une sole rotative assurant une homogénéité du flux de chaleur atteignant le produit.

Pour expliquer la forme finale irrégulière les mesures de densité de flux de chaleur peuvent être utilisées (cf. §3.1.2.2). Le moule fixé sur la sole est chauffé par l'air chaud arrivant sur un côté, entraînant des flux de chaleur non symétriques par rapport à l'axe du produit. L'air chaud circule perpendiculairement à la droite du moule et au-dessus du moule. Il peut atteindre la partie gauche du produit dans le moule, créant localement une turbulence avec une forte convection. Ceci se traduit par une température plus élevée et la formation de croûte plus rapidement sur le côté gauche du moule. La croûte représentant une résistance au gonflement, l'expansion observée est plus élevée à droite (Figure 51). On trouve une coloration plus importante sur le côté droit correspondant à une proportion de flux radiatif plus élevé (35% comparé à 10% à gauche).

### **3.2.6 Conclusion sur les résultats de la cuisson de génoise à 160°C**

Des essais de cuisson de génoise menés dans un four pilote ont permis de mesurer les profils de températures, les cinétiques d'expansion et les cinétiques de perte de masse de la pâte. A 160°C le temps de cuisson est de 81 min pour une perte de masse contrôlée de 6%.

Trois phases sont observées à partir des profils de température. Avant 2500 s, le chauffage de la pâte par le fond du moule étant progressif, le gradient de température observé va en augmentant du fond vers la surface. Après 2500s il y a inversion du gradient avec une température de la mie assez homogène évoluant de 75-80 jusqu'à 90°C. La température interne de la génoise ne dépasse pas 100°C pendant la période de chauffage.



La température de surface dépasse 100°C dès les 300 premières secondes de chauffage conduisant à la formation rapide de la croûte qui va ensuite se colorer et se dessécher. Elle augmente exponentiellement jusqu'à se rapprocher de la température de l'air du four à la fin de la période de chauffage.

Nous avons enregistré une augmentation de la pression interne de 7 à 8 mbar pendant le chauffage avec une accélération de l'élévation de la pression vers 70-80°C de température interne.

Le suivi en continu des variations d'épaisseur et de masse a permis de suivre l'évolution de la masse volumique pendant la période de chauffage. Elle est divisée par 2 (680 à 340 kg/m<sup>3</sup>). On retrouve trois périodes déjà signalées : faible variation jusqu'à 2500 s, puis accélération entre 2500 et 3500 s et diminution lente jusqu'à la fin de chauffage.

La forme de la génoise obtenue après chauffage à 160°C s'explique par les mesures de flux radiatifs et convectifs «*vus*» au niveau de la surface du produit, liés à la circulation d'air et à la forme du moule.

L'influence de la température de l'air du four sur ces paramètres sera le sujet du prochain chapitre. Des mesures en continu pendant le chauffage et le refroidissement couplés avec des mesures en dehors du four seront faites pour mieux caractériser la génoise cuite aux différentes températures.



(a)



(b)



(c)

Figure 52 : Tranches de génoise cuite (a) 160°C ; (b) 180°C ; (c) 220°C (Vair = 3,5 m/s)

### 3.3 Comparaison de la cuisson de génoise à différentes températures

L'effet de la température de l'air pour la phase de chauffage sur la cuisson de la génoise est étudié, en choisissant les trois températures 160, 180 et 220°C, et en répétant chaque essai au minimum trois fois.

Pour ces cuissons, nous avons conservé la même formule, le même moule et la même quantité de pâte initiale, soit 700g.

Le moule chargé de pâte est introduit dans le four préchauffé à la température fixée. Dans les trois cas le chauffage de l'air est arrêté après une perte de poids contrôlée (balance) de 6% soit 42g (période dite de chauffage). Puis de l'air ambiant est soufflé dans la cellule de cuisson pendant une durée identique de 90 min (période dite de refroidissement).

A chaque essai, des mesures avant (couleur, teneur en eau et activité d'eau, conductivité thermique et chaleur spécifique), pendant (température de l'air, températures internes et de surface de la génoise, masse et épaisseur), et après cuisson (couleur, teneur en eau, activité d'eau, conductivité thermique et chaleur spécifique, masse volumique) ont été réalisées.

#### 3.3.1 Aspect général du produit cuit

De manière générale, le produit final est constitué d'une partie humide, la mie avec des petites cellules ouvertes (< 1 mm) (Figure 52) et une partie supérieure la croûte, fine et brune (épaisseur ~ 5 mm). Sous la croûte on observe une partie contenant des plus grandes alvéoles (~ 2 mm) sur une hauteur de 0,5 cm. Le fond du produit présente une très fine couche brune et humide.

L'aspect général de la génoise après cuisson permet de constater que la forme de la génoise change quand elle est cuite à plus haute température. En effet, pour la température de chauffage élevée (220°C), la génoise présente un dôme plus élevé au centre, de bords plus courbés, et de couleur plus foncée. Sato et al (87) font les mêmes observations pour des cuissons effectuées dans un four à circulation d'air similaire au nôtre. Ils ont noté que la forme de génoise peut être ciblée en choisissant une température de cuisson et une vitesse d'air adéquates : une forme aplatie pour le nappage sera obtenue avec des cuissons à basse température et grande vitesse d'air.

Lorsque la température de chauffage augmente, la croûte supérieure est moins fissurée et moins fragile au démoulage et à la coupe. Le mince film de mie très humide situé sous la croûte à 160°C disparaît quand la cuisson se fait à plus haute température.

Une croûte inférieure (fond de la génoise), presque inexistante pour la génoise cuite à 160°C est de plus en plus apparente quand on cuit à plus haute température. Les mêmes remarques peuvent être faites pour les bords latéraux de la génoise.

Après refroidissement, des tranches de génoises découpées avec soin, ont été scannées dans le but d'étudier l'alvéolation de la mie. Le traitement a été effectué sur des images de même dimensions (7,5 \* 4 cm).

Nous avons remarqué que les génoises cuites à 180°C contiennent des alvéoles plus grandes que celles cuites à 220°C et à 160°C : les aires en cm<sup>2</sup> des plus grandes alvéoles sont de 0,052 – 0,060 – 0,048 respectivement pour les génoises cuites à 160 – 180 – 220°C. Le nombre d'alvéoles est sensiblement le même pour 180 et 220°C (576 et 568) et reste supérieur à 160°C (452). L'aire minimale que nous avons détectée varie entre 5 et 9.10<sup>-4</sup> cm<sup>2</sup>. Nous n'avons pas comptabilisé les alvéoles dont la taille était de l'ordre de la résolution (pixel).

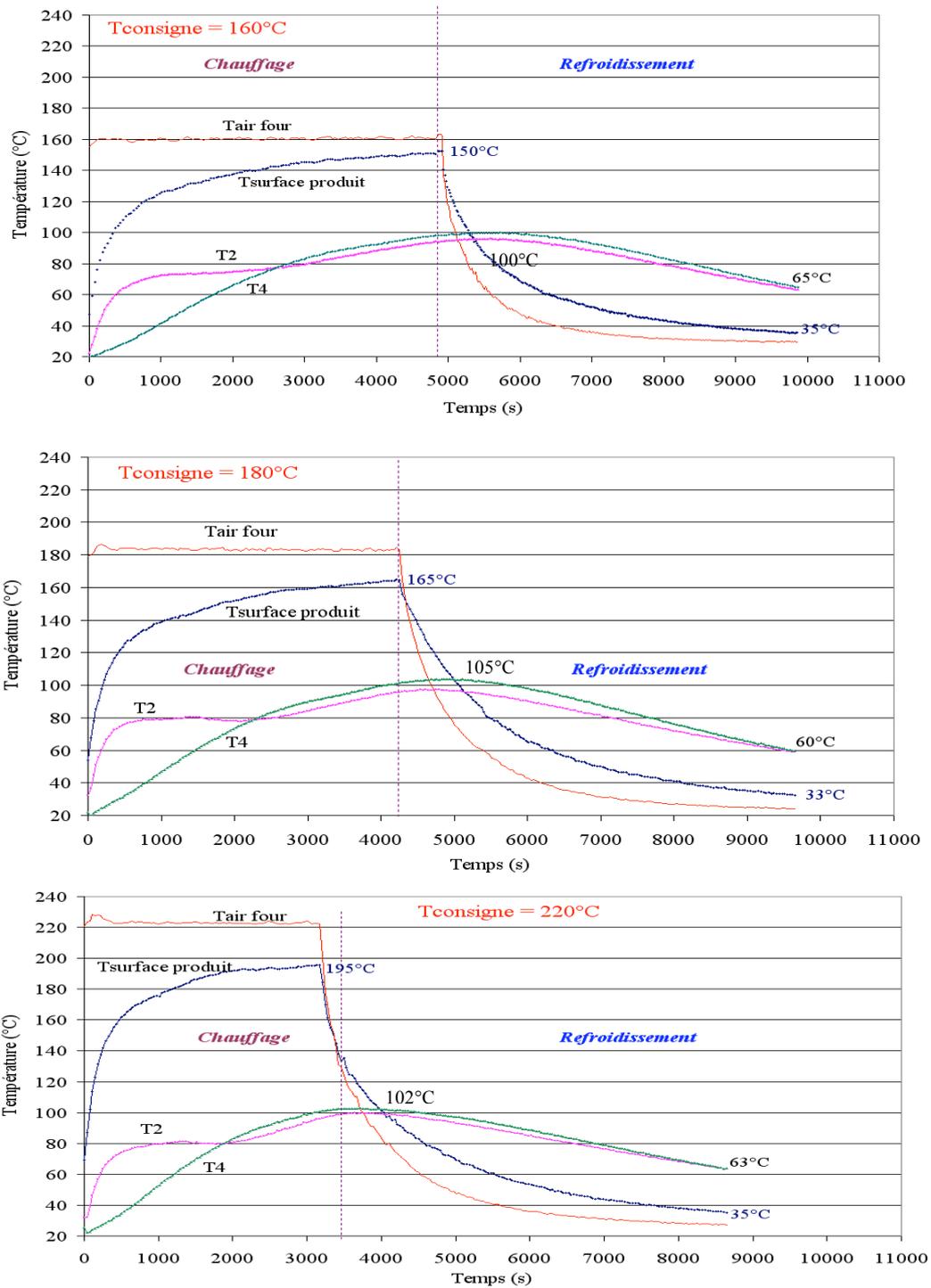


Figure 53 : Variation de la température du four, de la température de surface et des températures internes de la génoise pendant le chauffage et le refroidissement aux trois températures de cuisson.

Tableau 13 - Comparaison des valeurs pasteurisatrice ( $z = 7^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{Tréf} = 70^{\circ}\text{C}$ ) et cuisatrice ( $z = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{Tréf} = 100^{\circ}\text{C}$ ) pour les températures de consigne de 160, 180 et 220°C

Température (°C)	chauffage		refroidissement	
	Vp (min)	Vc (min)	Vp (min)	Vc (min)
160	547,6	40,3	1838,8	91,1
180	602	38,8	1891,2	90,8
220	628	31,1	2386	93

### 3.3.2 Température

Pendant les cuissons à 160°C, 180°C et 220°C nous avons mesuré les températures de surface (Ts) et internes du produit, et la température de l'air du four ainsi que sa température de rosée. La *température de l'air du four* est stable pendant le chauffage pour les trois températures. Elle varie au maximum de  $\pm 3^\circ\text{C}$  autour de la température de consigne.

Les mesures de la *température interne* dans la génoise sont comparées en deux points : à 7 mm (T4) et à 28 mm (T2) par rapport au fond du moule. Le thermocouple T2 se trouve avant cuisson à quelques millimètres sous la surface de la pâte.

La cinétique de montée en température interne présente la même allure pour les différentes températures de cuisson. Un gradient de température s'établit au sein du produit dès le début du chauffage ( $T2 > T4$ ), la température la plus élevée se trouvant sous la surface du produit.

Ensuite, avec le gonflement et le chauffage par le fond du moule, la température T4 rejoint T2, à 75°C, 79°C, 81°C, respectivement pour le chauffage à 160°C, 180°C, 220°C. Plus on augmente la température de cuisson, plus ce phénomène apparaît rapidement après 2500 s, 2300 s et 1900 s respectivement à 160°C, 180°C et 220°C.

Ensuite, dans tous les cas, T4 devient supérieure à T2 jusqu'à la fin du chauffage, où l'écart entre ces deux températures est inférieur à 5°C.

Au refroidissement la température du four atteint 100°C au bout de 5, 8 et 10 min respectivement pour les essais à 160, 180 et 220°C. Quand la température atteint 60°C après 1000 secondes (à 160°C), la température de surface du produit est de 80°C ; 85 et 80°C pour les essais à 180 et 220°C. La température de la mie reste élevée 95 – 100°C (T2, T4).

Après chauffage à 220°C, la température de la mie descend au-dessous de 80°C à partir de 60 min de refroidissement. Cette période se réduit à 57 min quand le chauffage est effectué à 180°C, et 45 min à 160°C. La température du four est alors de l'ordre de 30°C.

En fin de refroidissement (90 min), la température interne de la génoise est égale à 65 - 55 - 65°C respectivement pour les cuissons à 160 - 180 - 220°C. Ces mesures montrent que la cuisson continue pendant le refroidissement. Cette période doit être prise en compte dans le barème de cuisson : cela peut contribuer à la pasteurisation et à la stabilisation du produit final.

Afin de vérifier ce point nous proposons de calculer les valeurs pasteurisatrices et cuisatrices en utilisant l'équation suivante (d'après Bimbenet *et al*, 2002) :

$$V_p = V_c = \int 10^{\frac{T(t)-T_{\text{réf}}}{z}} .dt = \sum 10^{\frac{T(t)-T_{\text{réf}}}{z}} .\Delta t_i$$

avec :

- pour  $V_p$  :  $z = 7^\circ\text{C}$  et  $T_{\text{réf}} = 70^\circ\text{C}$  et  $T(t) = T2$
- pour  $V_c$  :  $z = 30^\circ\text{C}$  et  $T_{\text{réf}} = 100^\circ\text{C}$

Le Tableau 13 montre que pour les différentes températures de chauffage la valeur pasteurisatrice obtenue en fin de chauffage est inférieure de moitié à celle obtenue à la fin du cycle chauffage et refroidissement. Nous obtenons des valeurs cuisatrices de 40,3 - 38,8 et 28,8 min en fin de chauffage respectivement pour les cuissons à 160, 180 et 220°C. Les valeurs pasteurisatrices sont également très proches : 547, 602 et 412 min. A la fin du cycle chauffage et refroidissement les valeurs pasteurisatrices ont été multipliées par un facteur 3 à 5 et sont respectivement de 1838 – 1891 – 2386 min tandis que les valeurs cuisatrices sont de 91,1 – 90,8 – 93 min. Il apparaît clairement que la phase de chauffage a pour rôle de conférer au produit ses propriétés d'usage (structure, goût, couleur) en transformant et en figeant la structure mais le refroidissement contribue à stabiliser ces propriétés.

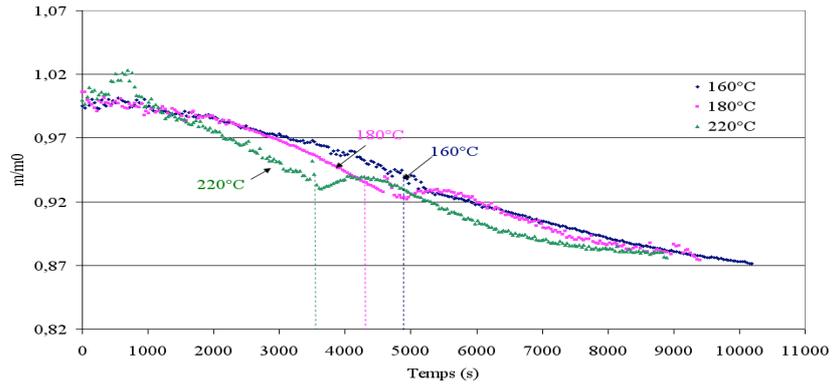


Figure 54 : Perte de masse relative pour chaque température de cuisson

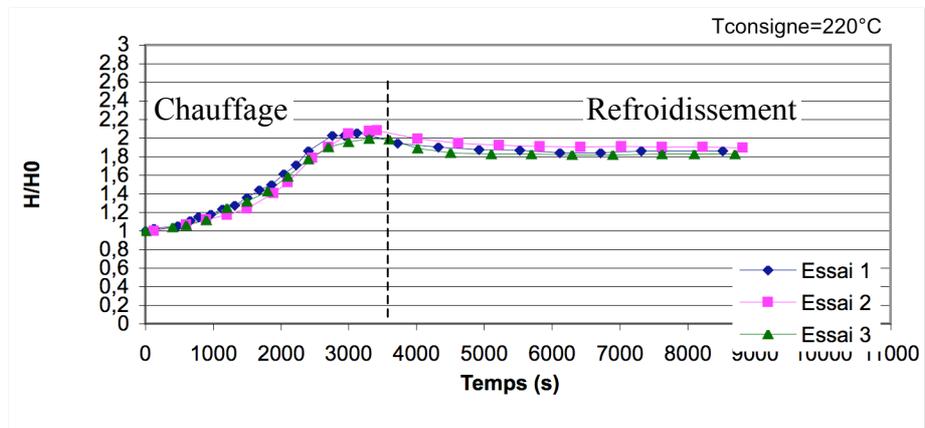
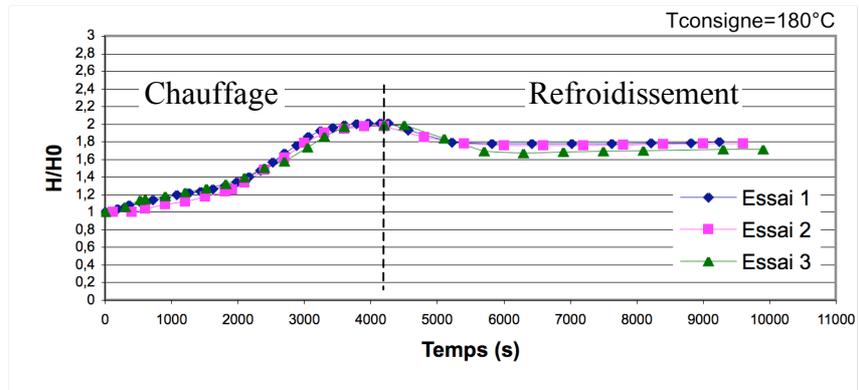
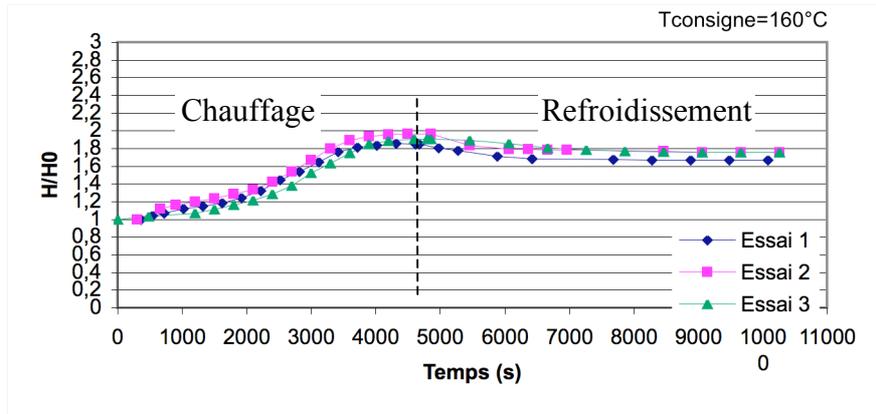


Figure 55 : Evolution de la hauteur de la génoise pendant la cuisson à 160°C, 180°C et 220°C.

La température de surface présente aussi des allures similaires pour les trois températures de cuisson. Elle augmente exponentiellement dès les premières minutes de chauffage et atteint 100°C après 300 s, 180 s et 80s respectivement à 160°C, 180°C et 220°C. A la fin du chauffage, elle atteint 150, 165 et 195°C avec un écart entre la température de surface et la température de l'air du four de 11°C, 15°C et 26°C respectivement pour les cuissons à 160°C, 180°C et 220°C.

Pour une température de l'air du four inférieure à 30°C à la fin du refroidissement, la température de surface de la génoise est voisine de 35°C (34 à 160°C, 36°C à 180°C, 35°C à 220°C).

La période de chauffage permet à la pâte de cuire avec transformation en croûte et mie s'accompagnant d'une perte d'eau par la surface. A la fin du chauffage la croûte est formée et la surface est brune. Le refroidissement lent de l'intérieur du produit avec perte de masse va correspondre à la stabilisation du produit (augmentation de la valeur pasteurisatrice).

### 3.3.3 Perte de masse

La perte de masse de la génoise à la fin de la période de chauffage par rapport à la masse initiale de la pâte a été fixée pour toutes les températures utilisées à 42 g représentant 6% de la masse initiale (700g). Dans les 3 cas, au cours du refroidissement, le produit perd la même quantité d'eau que lors de la phase de chauffage ; soit au total (chauffage + refroidissement) en moyenne 12% de la masse initiale.

Le Tableau 14 donne la moyenne de perte de masse calculée pour 3 essais et l'écart type par température fixée.

La vitesse de perte de masse pendant le chauffage augmente en fonction de la température (Figure 54). Cette vitesse calculée entre 2500 s et la fin du chauffage, est de  $-1,1 \cdot 10^{-2}$  ;  $-1,5 \cdot 10^{-2}$  et  $-2,5 \cdot 10^{-2}$  g d'eau/s respectivement à 160°C, 180°C et 220°C. La perte de masse enregistrée après chauffage à 220°C est de 6,8%. Pour la même durée de chauffage (57 min), la perte est de 4,2% et de 3,5% pour le chauffage à 180°C et 160°C, avec la même vitesse de circulation d'air. A noter que la température de surface du produit après ce temps est respectivement de 145, 160 et 195°C, correspondant à un écart  $T_{air} - T_{surface}$  respectivement de 15, 20 et 25°C, pour les trois températures de chauffage 160, 180 et 220°C. Rask *et al* (1989) trouvent dans le cas de la cuisson de pain à différentes températures et à vitesse d'air constante, que le coefficient de transfert par convection reste constant, alors que le coefficient de transfert radiatif et par la suite le coefficient de transfert apparent augmente légèrement.

Pendant le refroidissement, la génoise cuite continue à perdre du poids (eau). Après 90 min de refroidissement dans le four réglé à 20°C, la génoise perd 6,7%, 6,0%, 6,1% par rapport à sa masse à la fin du chauffage, ce qui correspond à une perte totale de 11,9%, 11,8%, 12,7% par rapport à la masse initiale de la pâte respectivement pour les cuissons à 160, 180 et 220°C.

L'augmentation de la vitesse de circulation de l'air frais dans le four provoque une déviation de la balance au début du refroidissement qui se stabilise progressivement. Ceci engendre un bruit lors de l'acquisition de la masse et empêche de prendre en compte des mesures faites au cours du refroidissement.

La vitesse de l'air a un effet significatif sur la perte de masse de la génoise (Sato *et al*, 1987 ; Standing, 1974), ce qui explique la forte perte de masse obtenue lors du refroidissement.

**Tableau 14 - Perte de masse ( $m/m_0$ ) après le chauffage et le refroidissement de la génoise pour trois températures de chauffage (160°C, 180°C, 220°C). (Moyenne de trois répétitions)**

	Perte de masse au chauffage	Perte de masse au refroidissement	Perte de masse totale ( $m_{finale}/m_{initiale}$ )
160°C – 81 min	5,9 ± 5,9%	6,7 ± 6,4%	11,9 ± 7,6%
180°C – 71 min	6,1 ± 2,7%	6,0 ± 7,9%	11,8 ± 5,3%
220°C – 57 min	6,8 ± 5,5%	6,1 ± 7,1%	12,7 ± 3,6%

**Tableau 15 - Variation de hauteur et de volume de la génoise pour trois températures de chauffage (160°C, 180°C, 220°C). (H : hauteur enregistrée en fin de chauffage et en fin du refroidissement /H ; H<sub>0</sub> : hauteur initiale).**

	Hauteur initiale H <sub>0</sub> (mm)	Volume initial (L)	H/H <sub>0</sub>		Volume		
			Après chauffage	Après chauffage et refroidissement	Fin chauffage (L)	Fin refroidissement (L)	Perte de volume au refroidissement
160°C	34	0,942	1,91 ± 0,05	1,73 ± 0,04	1,82±0,03	1,67±0,04	8,4%
180°C	34	0,942	1,99 ± 0,01	1,77 ± 0,04	1,94±0,03	1,72±0,01	11,2%
220°C	35	0,942	2,04 ± 0,04	1,86 ± 0,03	2,05±0,05	1,87±0,04	9,0%

### 3.3.4 Hauteur et volume

La variation de la hauteur au centre présente des allures semblables pour les trois températures étudiées (Figure 55).

Pendant la période de chauffage, 3 zones peuvent être identifiées avec des durées variables : la première caractérisée par une augmentation régulière de la hauteur à vitesse constante. Ensuite, la hauteur augmente rapidement avant de se stabiliser à la fin du chauffage.

Dès que l'air frais est soufflé, nous constatons une faible diminution de la hauteur suivie d'une stabilisation jusqu'à la fin du refroidissement.

D'autres études ont montré que l'augmentation de la température de chauffage provoque un gonflement plus important et plus rapide de la génoise pendant la cuisson (Sato *et al*, 1987, Lostie *et al*, 2002).

Dans les trois cas, l'augmentation plus rapide de hauteur se situe lorsque la température du produit atteint 75 - 80°C pour T2 - T4 après 2500 s, 2300 s et 1900 s respectivement pour les cuissons à 160°C, 180°C et 220°C. Cette plage de température correspond à la gélatinisation de l'amidon (Manley, 2000). L'augmentation rapide des températures internes du produit (§ 3.3.2) accélère l'avancement des différentes transformations biochimiques des constituants de la pâte et l'expansion thermique de l'air contenu dans les alvéoles (peu visibles à l'œil nu dans la pâte initiale).

Après refroidissement, le produit s'effondre de 5 à 7 mm pour les trois températures soit 9,5%, 11,4% et 8,8% de perte en hauteur par rapport à la hauteur maximale atteinte en fin de chauffage (65±1, 68±1, 72± 2 mm pour H<sub>0</sub> de 34, 34, 35 mm).

A 180°C nous observons un affaissement plus important que celui observé pour 160°C, tandis que la génoise cuite à 220°C s'affaisse moins. A la fin de la période de chauffage, la perte de masse étant la même, la différence entre les essais provient des différences de températures internes et de surface du produit. A 180°C, la température interne augmente plus rapidement qu'à 160°C avec peut-être un temps plus court pour établir une structure rigide d'où un affaissement ultérieur plus important. Pour les essais à 220°C la structure du produit est bien fixée à la fin du chauffage. Ces remarques se justifient par l'observation d'une chute importante de pression interne au cours du refroidissement (Figure 49).

Le critère de fin de la phase de chauffage que nous avons choisi pour les différentes cuissons (la même perte de masse) conduit à des hauteurs finales différentes pour les trois températures. Dans une étude précédente (Ben Yaghlane, 2001), pour le même protocole d'essai (pâte, moule, four) et les mêmes températures de chauffage, le critère de fin de cuisson adopté était de garder la même durée de chauffage (81min) pour les différents essais. Dans ce cas, l'effondrement était observé avant la fin du chauffage. Lostie et al (2002), qui avaient adopté comme critère la même durée de chauffage avaient remarqué que l'effondrement était plus prononcé quand le chauffage avait lieu à plus haute température. Il faut noter que dans ce moule le chauffage se faisait essentiellement par la surface du produit.

Dans notre étude, l'élévation de température de consigne du four permet un gain de temps accompagné d'un gain en hauteur finale. Le produit atteint sa hauteur maximale pendant la période de chauffage et un léger effondrement est observé en période de refroidissement. Pour une même perte en eau, le réseau protéique sous l'effet de la température devient plus élastique, l'air contenu dans les alvéoles se dilate plus rapidement. Ce comportement doit aussi être associé au moule utilisé (isolation des côtés) et aux modes de transfert de chaleur (fond et surface).

La variation de volume de la génoise pendant le chauffage présente la même allure que la variation de la hauteur pendant la cuisson. L'augmentation de la température de cuisson, provoque une augmentation plus importante (Sato *et al* (1987)) et plus rapide du volume de la

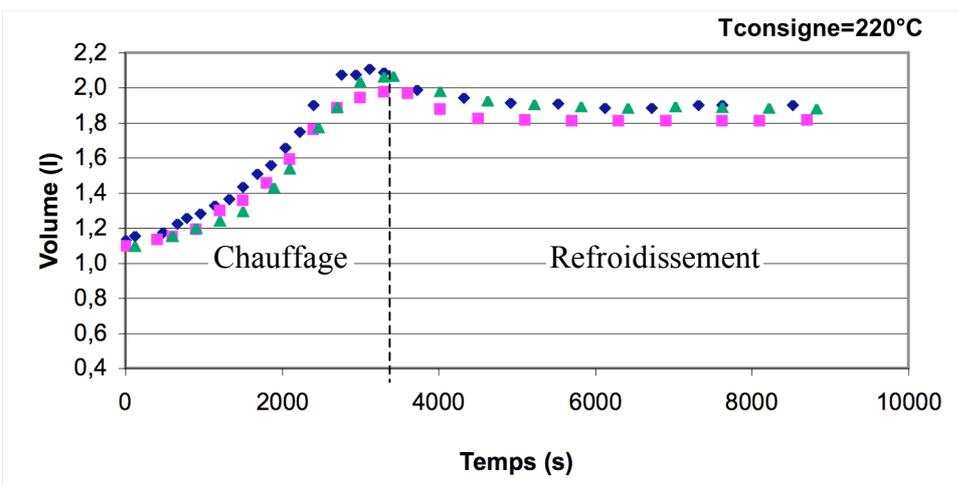
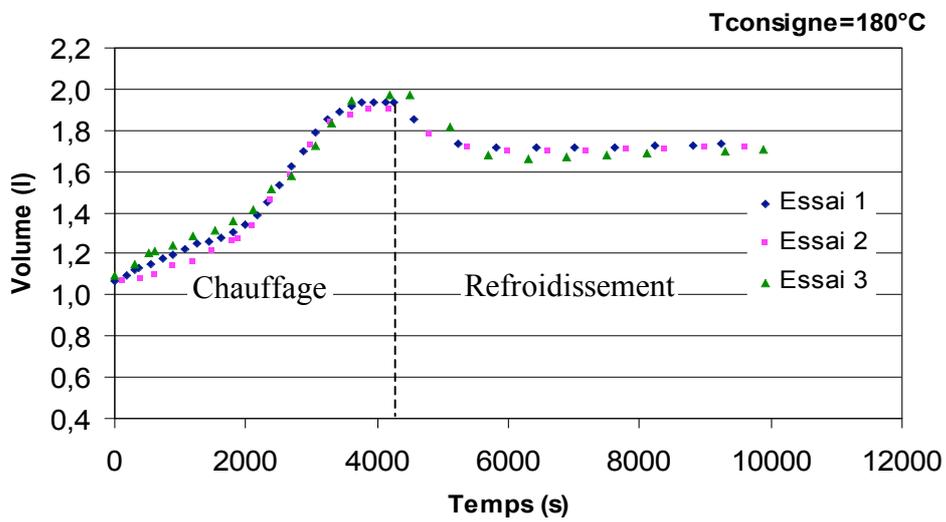
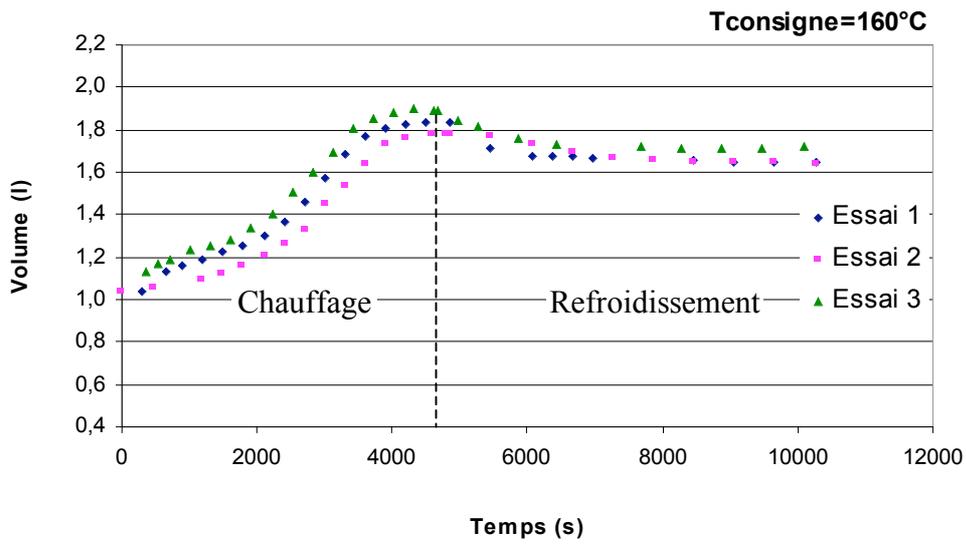


Figure 56 : Evolution du volume de la génoise pour les 3 températures de cuisson.

génoise (Tableau 15). La génoise cuite à 180°C subit un effondrement plus important que celle cuite à 160 et 220°C, correspondant aux variations de hauteur finale commentées précédemment.

### 3.3.5 Masse volumique

Il résulte des variations de masse et de hauteur que la variation de la masse volumique n'est pas linéaire pendant le chauffage comme il est souvent supposé en modélisation, en l'absence de mesures réelles.

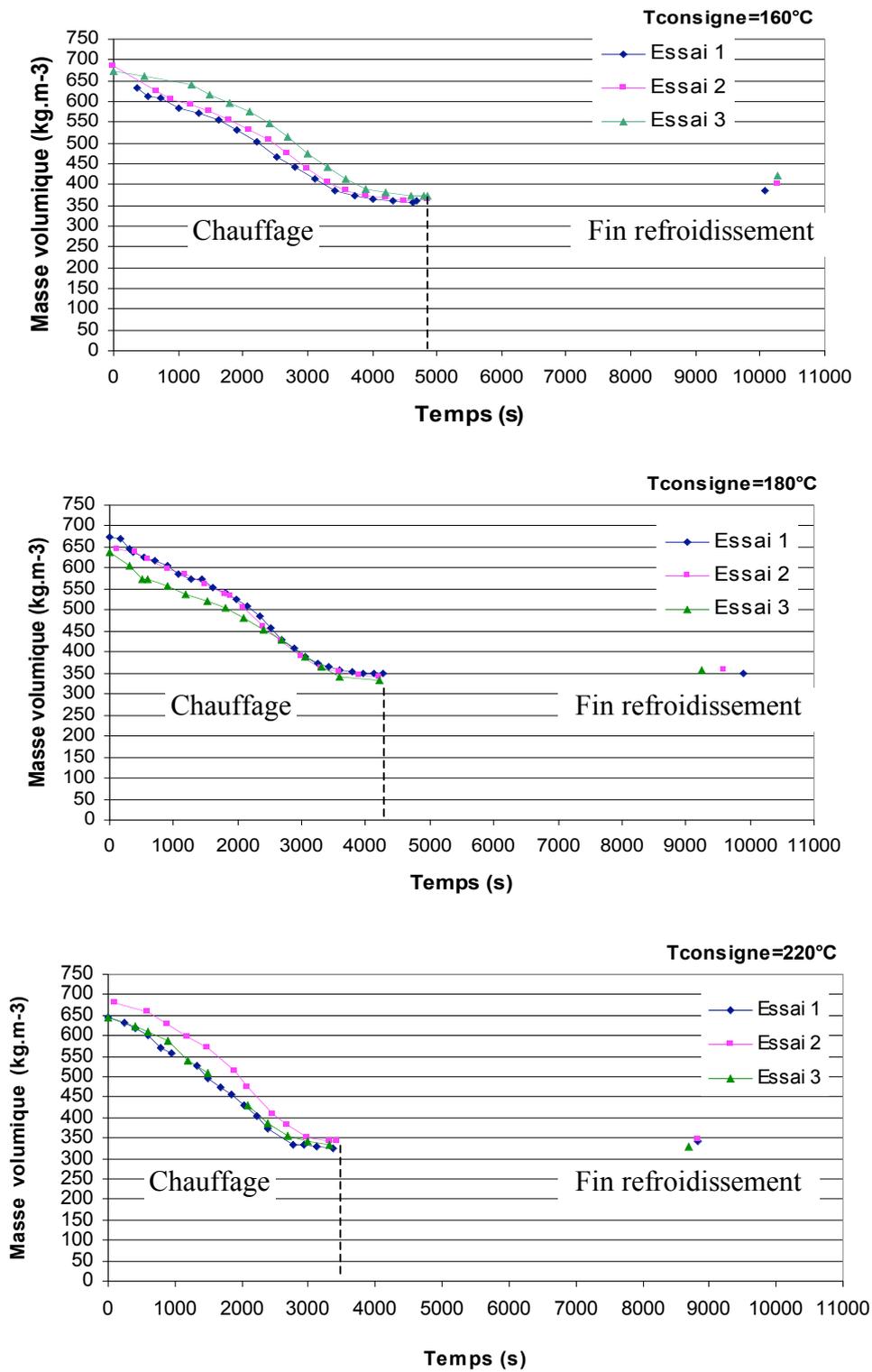
Elle peut être décrite par 3 phases distinctes (Figure 57). Dès la première période de chauffage, la faible diminution de la masse et l'augmentation linéaire du volume engendre une diminution de la masse volumique. Cette période est plus longue quand la température de l'air est plus faible. Durant la seconde période de chauffage, nous avons remarqué une forte augmentation du gonflement et de la perte de masse, provoquant une accélération de la diminution de la masse volumique. Le produit perd 20%, 28% et 29% de sa masse volumique initiale au bout de 2500s, 2300 et 1900s respectivement à 160°C, 180°C et 220°C de cuisson. A la fin du chauffage, nous avons une quasi-stabilisation de la masse volumique suite à la stabilisation du gonflement et la diminution progressive de la masse. La masse volumique est divisée par deux pour les trois essais soit  $365 \pm 6$ ,  $341 \pm 9$ ,  $333 \pm 7$  kg.m<sup>-3</sup> respectivement pour 160, 180, 220°C (masse volumique initiale moyenne 680 kg.m<sup>-3</sup>).

L'évolution de la masse volumique au cours du refroidissement n'a pas pu être calculée à cause des problèmes rencontrés pour le suivi de la masse. La masse volumique du produit cuit mesurée après refroidissement (graine de colza) est égale à  $403 \pm 14$ ,  $354 \pm 5$ ,  $340 \pm 7$  kg.m<sup>-3</sup> pour les trois températures 160, 180 et 220°C respectivement.

Pour les trois conditions de cuisson, la masse volumique finale varie par rapport à la fin du chauffage suite à l'effondrement du produit et à la perte de masse au refroidissement. L'augmentation est d'autant plus importante que la température de chauffage est faible (Tableau 16). Après refroidissement, nous avons constaté une perte de masse par rapport à la masse en fin de chauffage égale à 6,7%, 6,0% et 6,1% et une perte de volume de 8,4%, 11,2% et 9,0% correspondant à une augmentation de la masse volumique par rapport à la fin du chauffage égale à 6,5, 4,8 et 2,2% respectivement pour les cuissons à 160, 180 et 220°C. La masse volumique de la génoise cuite à 220°C varie peu pendant le refroidissement à cause de la structure plus rigide établie dès la fin de la période de chauffage.

**Tableau 16 - Variation de la masse volumique de la génoise pour trois températures de cuisson. 160°C-180°C-220°C. ( $\rho$  : masse volumique en fin de chauffage et après refroidissement ;  $\rho_0$  : masse volumique initiale).**

	$\rho/\rho_0$		$\rho$ pâte (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$ génoise cuite (kg/m <sup>3</sup> )
	Chauffage	Total		
160°C – 81min	$0,550 \pm 0,015$	$0,607 \pm 0,008$	$663 \pm 10$	$403 \pm 14$
180°C – 71 min	$0,522 \pm 0,006$	$0,543 \pm 0,011$		$354 \pm 5$
220°C – 57 min	$0,506 \pm 0,008$	$0,517 \pm 0,012$		$340 \pm 7$



**Figure 57 : Variation de la masse volumique de génoise au cours des cuissons à 160, 180, 220 °C.** (Chauffage : masse mesurée/volume calculé ; fin refroidissement  $\rho_{\text{finale}}$  = masse mesurée/volume mesuré avec graines)

### 3.3.6 Propriétés du produit

#### 3.3.6.1 Couleur de la surface du produit cuit

Les mesures de couleur de la surface du produit ont été effectuées sur les génoises cuites et refroidies. L'observation visuelle donne une croûte pâle pour la cuisson à 160°C, colorée brune à 180°C et brune très foncée, terne à 220°C.

Les mesures situées perpendiculairement au sens de circulation de l'air (2, 4 et 5) donnent des valeurs identiques. Les mesures situées parallèlement au sens de circulation de l'air chaud (1 ; 5 ; 3) (Figure 58) donnent des valeurs différentes.

Pour toutes les positions et températures, la luminance du produit diminue quand la température de l'air augmente. Ceci est en relation avec l'augmentation de la température de surface en fonction de la température de l'air du four, favorisant un brunissement plus important de la surface du produit (Shibukawa *et al*, 1989, Sato *et al*, 1987). Si on compare les valeurs de L à celle de la pâte, les cuissons à 160°C et 180°C engendrent un léger brunissement, les valeurs de L étant proches. Les valeurs relatives aux cuissons à 180°C sont légèrement plus faibles que celle de la pâte. Les valeurs de L observées pour les cuissons à 220°C sont plus faibles : la génoise cuite devient beaucoup plus colorée que la pâte quand la cuisson se fait à plus haute température.

En comparant les positions 3 (entrée air), 5, 1 (sortie air) nous pouvons observer que globalement la luminance du produit diminue dans le sens de la circulation de l'air. La première zone « touchée » par l'air chaud est celle correspondant à la position 1 tandis que la zone correspondant à la position 3 est protégée par la paroi du moule, comme il a été observé dans les mesures de flux (§3.1.2.2) : 3 doit être plus coloré car recevant un flux radiatif plus important (39% et 13% de flux radiatif par rapport au flux total, respectivement en position 3 et 1).

Le chroma est identique (25-28) pour les températures 160°C-180°C à chaque position de mesure : la saturation est homogène. Les positions 1 et 5 à 220°C se trouvent nettement en dehors de cette gamme vers des chromas plus petits (5 et 12) correspondant à une couleur plus foncée.

Ces mesures confirment bien les observations de la génoise cuite : un brunissement plus important de la génoise quand la cuisson se fait à plus haute température. Compte tenu de l'homogénéité en vitesse et température de l'air qui a été établie, on voit une variation sensible à l'augmentation de la capacité de l'air à transférer la chaleur quand la température augmente. Ceci peut représenter un moyen de contrôler la couleur de surface par un appoint modulé de chaleur convective.

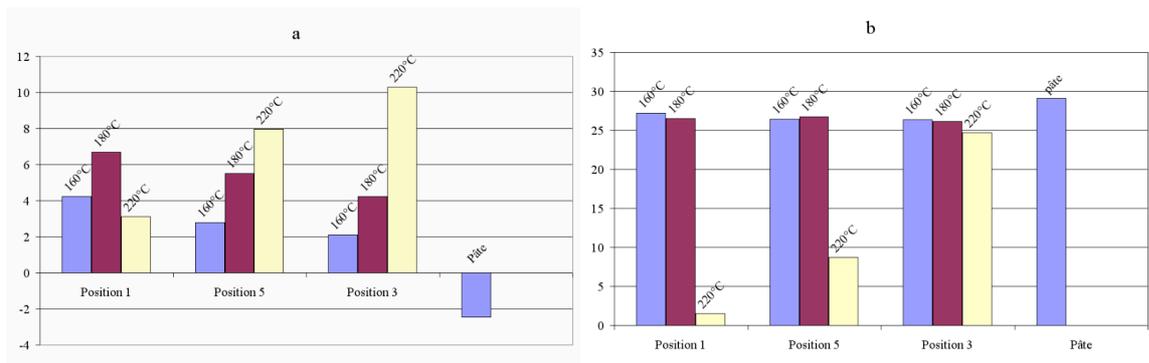
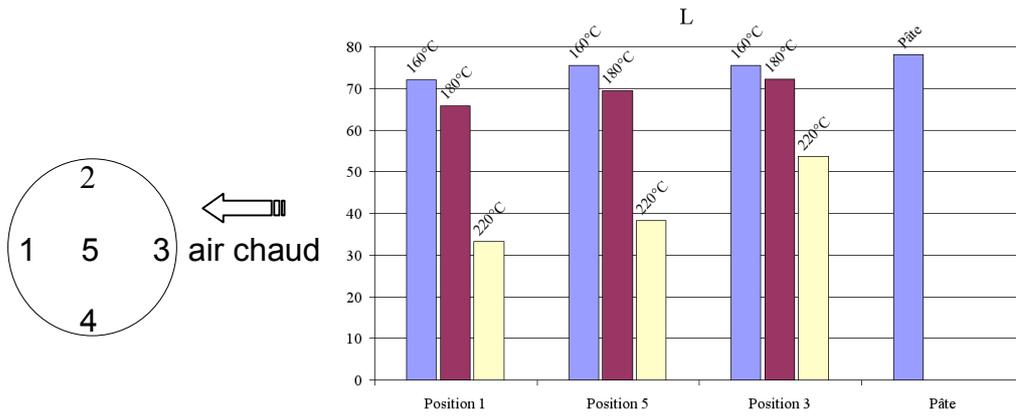


Figure 58 : L, a, b pour les différentes températures (160°C-180°C- 220°C) et position de mesures (1,5,3).

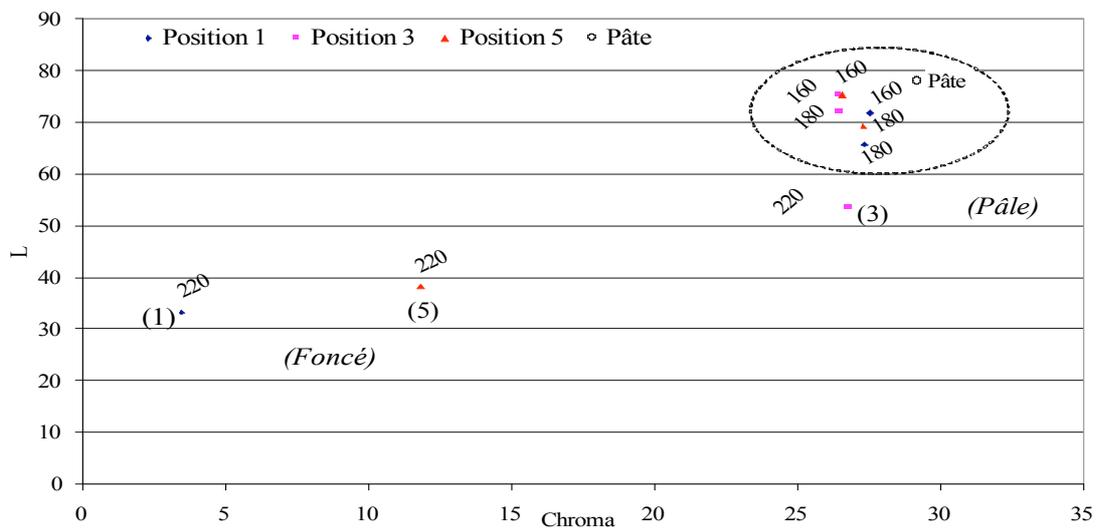


Figure 59 : Représentation de la valeur de L en fonction du chroma

### 3.3.6.2 Teneur en eau, activité de l'eau et texture

La teneur en eau des pâtes utilisées pour les différentes cuissons varie entre 46,3 et 53,4 g eau/100g MS avec une valeur moyenne de  $49,8 \pm 3,6$  g d'eau/100 g MS (ou 33 g d'eau/100 g pâte humide). Les valeurs trouvées dépendent des matières premières, et en particulier des œufs. L'activité de l'eau est de 0,92.

Après chauffage et refroidissement il existe un gradient de teneur en eau dans la mie de la génoise. La mie du fond ( $< 0,5$ mm) est plus sèche que la mie au centre de la génoise. La teneur en eau de la mie est plus importante quand on s'approche de la croûte supérieure. Elle reste proche de la teneur en eau initiale de la pâte (50 g eau/100 g MS) tout en diminuant légèrement, sa valeur finale est comprise entre 44 et 47,8 g eau/100g MS quelque soit la température de chauffage. L'activité de l'eau de la mie varie peu par rapport à celle de la pâte (0,91-0,92) assurant le moelleux de la mie.

Les températures de surfaces mesurées sont très élevées dès le début de la cuisson. Elles atteignent 100°C plus rapidement quand la température de consigne du four est plus élevée (300 s, 180 s, 80 s respectivement pour les cuissons à 160, 180, 220°C). Ceci ce traduit par une formation de croûte plus importante quand la température est élevée dès les premières minutes du chauffage favorisant son assèchement.

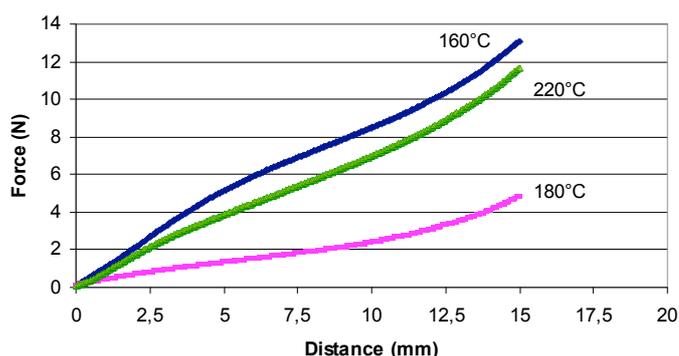
La croûte de la génoise cuite à 180°C ( $\sim 5$ mm) est plus sèche que celle cuite à 160°C :  $10,3 \pm 0,1$  g d'eau/100 g MS et  $13,1 \pm 0,4$  respectivement. Par contre la croûte de génoise cuite à 220°C est plus riche en eau que celle à 160°C :  $13,8 \pm 0,3$  g d'eau/100 g MS.

Le comportement à la compression du matériau final dépend de l'histoire thermique subie (temps, température). En effet la température a un effet sur les transformations chimiques à l'intérieur du matériau et aussi sur sa conformation interne (porosité en particulier). La perte en eau et le gain de volume du matériau à différentes températures se traduit par la formation d'une texture qui conditionne son comportement mécanique final.

La force maximale atteinte lors de la compression de la *mie* de la génoise cuite est respectivement de 13,1-5,3-11,6 N pour les essais à 160, 180 et 220°C (Figure 60). A 220°C, la perte de poids globale est plus importante qu'à 160°C avec un gonflement plus important (Tableau 17) : les forces de compression sont peu différentes. A 180°C la perte en eau globale est identique à l'essai à 160°C, cependant la température de surface ayant atteint une valeur plus élevée la croûte est plus sèche et la mie est restée plus humide conduisant à une force (exercée sur la mie) plus faible.

**Tableau 17 - Comparaison des paramètres pouvant influencer la texture de la génoise.**

Température chauffage (°C)	Hauteur finale génoise cuite	H/H <sub>0</sub> fin de chauffage	Durée totale de cuisson (min)	Perte de poids totale (%)	Teneur en eau g/100g MS		
					Pâte	Croûte	Mie
160	59	1,91	81	11,9	50,15	13,1	45,3
180	60	1,99	71	11,8	50,15	10,3	47,8
220	65	2,04	57	12,7	50,15	13,8	44



**Figure 60 : Test de compression sur la mie de génoise en fonction de la distance d'écrasement (160, 180, 220 °C)**

**Tableau 18 - Capacité thermique et teneur en eau des différents constituants de la pâte à 20°C**

	Teneur en eau % (base humide)	Cp des produits secs (J.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> ) (mesuré DSC)	Pâte		
			% en masse	Eau dans 100g	MS dans 100g
Farine sèche	14,2	915 ± 110	31	4,41	26,6
Sucre sec	0,16	1138 ± 64	31,06	0,05	31,01
Blanc d'œuf	86,28	1222 ± 49	16,6	14,32	2,28
Jaune d'œuf	51,9	1472 ± 175	14,47	7,51	6,96
Eau	100	4180	6,81	6,81	0

**Tableau 19 - Capacité thermique massique, masse volumique et conductivité thermique de la pâte et des génoises cuites (mie) à 160°C, 180°C et 220°C mesurées par CT mètre à température ambiante.**

Produit	$\rho C_p$ (kJ. m <sup>-3</sup> .C <sup>-1</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Cp (J.kg <sup>-1</sup> .C <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
Pâte	2075 ± 44	663 ± 12	3130	0,344 ± 0,058
Génoise 160°C	1160 ± 20	403 ± 14	2878	0,294 ± 0,003
Génoise 180°C	1143 ± 24	354 ± 5	3229	0,258 ± 0,010
Génoise 220°C	1155 ± 22	340 ± 7	3397	0,276 ± 0,015

### 3.3.6.3 Capacité thermique et conductivité thermique

La capacité thermique de la pâte de la génoise mesurée (DSC) à 25°C est de  $2034 \pm 103 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$  correspondant à une teneur en eau de  $33,4 \pm 1,2\%$  (base humide). Baik *et al* (1999), utilisant la même méthode d'analyse pour la pâte de gâteau type quatre-quarts (1/4 matière grasse, 1/4 farine, 1/4 sucre et 1/4 œufs) à 20°C avec une teneur en eau de  $34,6 \pm 1,9 \%$  (base humide), trouvent une capacité thermique de  $2516 \text{ J/kg.°C}$ .

La capacité thermique de la pâte calculée en considérant les Cp et les fractions massiques (x) des ingrédients (Tableau 18), est de  $2111 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ . Le calcul effectué avec une pâte faite d'eau (Cp  $4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ ) et de matière sèche (avec Cp moyen  $\sim 1000$ ) conduit à un résultat proche.

$$Cp(\text{pâte}) = x \cdot Cp(\text{eau}) + \sum(1-x) \cdot Cp(\text{matière sèche})$$

Le CTmètre fournit la valeur  $\rho.Cp$  en  $\text{J.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}$ . En utilisant la valeur de la masse volumique mesurée, nous en déduisons la capacité thermique massique à température ambiante (20°C) de la pâte ( $3130 \text{ J/kg.°C}$ ) et de la génoise cuite après refroidissement. Les résultats sont donnés dans le Tableau 19. Il faut noter la faible variation de Cp entre la pâte et la génoise cuite (mie), ce qui est important pour les calculs de transfert de chaleur.

Les valeurs de Cp de la pâte obtenues par DSC sont plus faibles que celles trouvées par le CTmètre (noté par Rabiey, 2005). Il faut remarquer que la mesure par le CTmètre se fait sur une grande quantité de produit (500g) alors que pour la DSC, la mesure se fait sur quelques milligrammes, ce qui peut induire des résultats différents.

Les conductivités thermiques de la pâte et des génoises cuites à 160°C, 180°C et 220°C puis refroidies sont respectivement de 0,34 et 0,29-0,26-0,28 W/m.K (Tableau 19).

La conductivité thermique de la pâte de génoise est supérieure à celle trouvée par Baik et al (1999) ( $0,206 \pm 0,007 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) dans le cas de la cuisson de gâteau quatre-quarts.

La conductivité thermique du produit cuit est inférieure à celle de la pâte. Ceci peut être dû au gonflement du produit au cours du chauffage (porosité) et à la diminution de la teneur en eau du produit en cours de cuisson (perte d'eau globale).

### 3.3.6.4 Conclusion

L'étude à différentes températures 160, 180 et 220°C, a montré que les conditions utilisées conduisent à un produit de qualité commerciale voisine : même masse finale ; même ordre de grandeur de la valeur cuisatrice pour l'ensemble chauffage refroidissement ; même moelleux du produit. La capacité thermique varie peu entre la pâte et le produit cuit du à une faible variation de la quantité d'eau. La conductivité thermique est modifiée par l'augmentation de la porosité du produit (gonflement).

Le choix de la température pourrait se faire à partir du coût énergétique. Sachant que les débits d'air utilisés sont les mêmes dans chacun des cas, la différence porte sur le niveau de température et la durée.

$$\text{Enthalpie} = \text{débit massique d'air} * Cp \text{ air} * \text{température (°C)} * \text{durée}$$

Le produit variable (température \* durée) est égal à  $160 * 81 = 12960$  ou  $220 * 57 = 12540$ , correspondant à des coûts énergétiques du même ordre de grandeur. Globalement la durée plus courte à 220°C peut être intéressante pour la productivité, le produit étant légèrement plus bombé et plus coloré.



## **4 Conclusions et perspectives**



Lors de la cuisson de produits céréaliers, la qualité du produit fini est le résultat des modifications physicochimiques (gélatinisation, gonflement, couleur ...) se produisant pendant la période de chauffage, se prolongeant lors du refroidissement. Les études menées sur des fours de taille industrielle montrent qu'il est difficile de réaliser des mesures en ligne compte tenu des niveaux de température et de la structure du four rarement modifiable.

Nous avons choisi d'instrumenter un four expérimental discontinu permettant la pesée en continu du moule, le contrôle de la température et de la vitesse d'air, la mesure des températures du produit et/ou de l'ambiance de cuisson. Ces résultats ont permis de vérifier la fiabilité des mesures de température et de vitesse d'air dans le four pour une valeur de consigne donnée. Nous avons pu déterminer une zone de cuisson homogène en température dans la cellule de cuisson.

La réalisation et l'implantation de capteurs de flux spécifiques a permis de quantifier la part respective du rayonnement et de la convection dans les transferts de chaleur (respectivement 25 et 75% du flux total au centre du produit) ainsi que d'évaluer les coefficients de transferts de chaleur (convection + rayonnement,  $33 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ). Associé à la mesure du flux de chaleur par contact (fond du moule), cela représente les conditions aux limites nécessaires dans une approche de modélisation. Cette méthodologie est applicable dans les fours industriels comme outils de diagnostic.

Un moule cylindrique instrumenté spécifique a été construit afin de favoriser un transfert de chaleur unidirectionnel par la surface ou par le fond du produit. Les parois isolantes en téflon sont munies d'une fenêtre permettant la prise d'images afin de suivre la hauteur du produit en son centre. Le rôle joué par le moule dans les différents transferts de chaleur, masse et pression interne du produit, les transformations de la pâte en mie et en croûte en surface, peuvent ainsi être étudiés. Toute l'étude expérimentale a été faite avec des couples temps/températures de chauffage ( $160^\circ\text{C} - 81 \text{ min}$ ,  $180^\circ\text{C} - 71 \text{ min}$ ,  $220^\circ\text{C} - 52 \text{ min}$ ) correspondant à une même perte de masse avec des conditions de refroidissement fixées (90 min, air soufflé à température ambiante). La taille, la structure et l'aspect de la génoise cuite correspondent à celle d'un produit industriel.

Lors des différentes cuissons trois phases sont observées au cours du chauffage, à partir des profils de température mesurés avec des thermocouples insérés dans la pâte.

Le chauffage de la pâte par le fond du moule est progressif, tandis que la surface du produit est rapidement portée à haute température. Ainsi on observe un gradient de température orienté du fond vers la surface, gradient qui s'inverse à un temps donné, suivi d'une certaine homogénéisation de la température dans la mie formée. En effet l'inversion se produit pour des temps de chauffage différents selon la température de chauffage, mais pour une température de produit voisine de  $70-80^\circ\text{C}$  : ce domaine de température correspond à la transformation de l'amidon et des protéines comme observé par d'autres auteurs, et donc à la formation de la structure plus rigide. L'observation est faite après 2500 s à  $160^\circ\text{C}$ , 2300 et 1900 s pour 180 et  $220^\circ\text{C}$  respectivement. Ceci correspond aussi à une augmentation plus rapide de la hauteur (75% du total) dans cette région, cette observation étant également valable pour la pression interne (accroissement de 7 - 8mbar).

La température de surface dépasse  $100^\circ\text{C}$  dès les 300 premières secondes de chauffage conduisant à la formation rapide de la croûte qui va ensuite se colorer et se dessécher. Elle augmente exponentiellement jusqu'à se rapprocher de la température de l'air du four à la fin de la période de chauffage.



Pour l'essai à 160°C, la température de la mie assez homogène évolue jusqu'à 90°C en fin de chauffage, et atteint 100°C au début du refroidissement. Elle est voisine de 100°C dès la fin du chauffage à 180 et 220°C.

La méthode mise en œuvre pour obtenir la hauteur à partir des images prises de la génoise permet le suivi en continu des variations d'épaisseur au centre du produit. Avec la variation de masse il a été possible d'évaluer l'évolution de la masse volumique pendant la période de chauffage. On retrouve trois périodes déjà signalées : faible variation jusqu'à 2500 s, puis accélération entre 2500 et 3500 s et diminution lente jusqu'à la fin de chauffage. Elle est au total divisée par 2 (680 à 340 kg/m<sup>3</sup>).

L'étude a montré qu'il était important de distinguer les phases de chauffage et de refroidissement en maîtrisant temps et températures. Au refroidissement il est constaté que la mie reste à température élevée voisine de 100°C conduisant à prolonger la cuisson pendant un temps important avec perte de poids (eau). Dans les cas étudiés, le refroidissement contribue à 50% de la valeur cuisatrice du procédé de cuisson et à 70% de la valeur pasteurisatrice. La hauteur finale du produit cuit est légèrement influencée par cette phase de refroidissement. L'affaissement du produit montre qu'il conserve une capacité de déformation après chauffage exploitable. Le produit garde une plasticité importante utilisable pour des modifications des propriétés de texture. Une étude plus détaillée du refroidissement représente une perspective intéressante.

La forme de la génoise cuite obtenue après chauffage à 160°C s'explique par les mesures de flux radiatifs et convectifs *vis* au niveau de la surface du produit, liés à la circulation d'air et à la forme du moule dans le four utilisé. La dissymétrie de volume observée pour les produits cuits pourrait être corrigée avec un plateau tournant ou une agitation de l'air chaud, mais la pesée en continu du moule ne permet pas cette modification. Un sens de circulation alternée de l'air apporterait une amélioration.

Le four SERVATHIN à convection forcée représente un outil utilisable pour le suivi en continu et la mise au point de la cuisson d'autres produits en moule. Cette étude a mis en évidence le rôle du refroidissement après chauffage pour la cuisson de génoise. Le choix du critère de fin de chauffage choisi dans cette étude (perte de poids) est pertinent et peut être appliqué avec des mesures discrètes sur un four industriel.



## **5 Références bibliographiques**



## **A**

Attenburrow, G. E., Goodband, R. M., Taylor, L. J. et Lillford, P. J. (1989). *Structure, mechanics and texture of a food sponge*. Journal of Cereal Science, 9(1): 61-70.

Audidier, Y. (1968). *Effects of thermal kinetics and weight loss kinetics on biochemical reactions in dough*. The Baker's Digest, 10: 36-42.

## **B**

Baik, O. D. et Marcotte, M. (2002). *Modelling the moisture diffusivity in a baking cake*. Journal of Food Engineering, 56: 27-36.

Baik, O. D., Marcotte, M. et Castaigne, F. (2000 a). *Cake baking in tunnel type multi-zone industrial ovens Part I. Characterization of baking conditions*. Food Research International, 33(7): 587-598.

Baik, O. D., Marcotte, M. et Castaigne, F. (2000 b). *Cake baking in tunnel type multi-zone industrial ovens Part II. Evaluation of quality parameters*. Food Research International, 33: 599-607.

Baik, O. D., Sablani, S. S., Marcotte, M. et Castaigne, F. (1999). *Modelling the thermal properties of a cup cake during baking*. Journal of Food Science, 64(2): 295-299.

Baker, B. A., Davis, E. A. et Gordon, J. (1990). *Glass and metal pans for use with microwave and conventionally heated cakes*. Cereal Chemistry, 67(5): 448-451.

Bakshi, A. S. et Yoon, J. (1984). *Thermophysical properties of bread rolls during baking*. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 17: 90-93.

Bell, A. V., Berger, K. G., Russo, J. V., White, G. W. et Weathers, T. L. (1975). *A study of the micro-baking of sponges and cakes using cine and television microscopy*. Journal of Food Technology, 10: 147-156.

Ben Yaghlane, H. (2001). *Etude expérimentale de l'expansion d'une mousse céréalière au cours de la cuisson*. DEA. ENSIA, Massy. 31p.

Bimbenet, J. J., Duquenoy, A. et Trystram, G. (2002). *Génie des procédés alimentaires. Des bases aux applications*. Paris, Ed. Dunod, 554 p.

Broyart, B. et Trystram, G. (2000). *Cuisson des produits céréaliers*. Industries Alimentaires et Agricoles, 117: 67-76.

## **C**

Chevallier, S., Della Valle, G., Colonna, P., Broyart, B. et Trystram, G. (2002). *Structural and chemical modifications of short dough during baking*. Journal of Cereal Science, 35: 1-10.

Clarke, C. (2004). *The science of ice cream*. Royal Society of Chemistry, 187 p.

## **D**

Dunn, J. A. et White, J. R. (1939). *The leavening action of air included in cake batter*. Cereal Chemistry, 16: 93-100.

Duquenoy, A. et Desage, R. (2000). *Etude, par mesure de flux thermiques, d'un procédé de cuisson utilisant la vapeur d'eau surchauffée*. Congrès français de thermique. SFT, Lyon.

## **F**

Fahloul, D., Trystram, G., Duquenoy, A. et Barbotteau, I. (1994). *Modelling Heat and Mass Transfer in Band Oven Biscuit Baking*. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 27(2): 119-124.

Fahloul, D., Trystram, G., McFarlane, I. et Duquenoy, A. (1995). *Measurements and predictive modelling of heat fluxes in continuous baking ovens*. Journal of Food Engineering, 26(4): 469-479.

## **G**

Garrison, C. L. et Peart, M. V. (1986). *Effects of radiant heat transfer: cake baking in a conventional electric residential oven*. Home Economics Research Journal, 14(3): 336-341.

Guinet, R. (1992). *Technologie du pain français*. Paris, Ed. BPI, 182 p.

## **H**

Hasatani, M., Arai, N., Harui, H. et Itaya, Y. (1992). *Effect of drying on heat transfer of bread during baking in oven*. Drying Technology, 10(3): 623-639.

He, H. et Hosney, R. C. (1991). *Gaz Retention in Bread Dough During Baking*. Cereal Chemistry, 68(5): 521-525.

Hwang, M. P. et Hayakawa, K.-I. (1980). *Bulk densities of cookies undergoing commercial baking processes*. Journal of Food Science, 45: 1400-1402,1407.

## **K**

Kiger, J. L. et Kiger, J. G. (1967). *Techniques modernes de la biscuiterie pâtisserie-boulangerie industrielles et artisanales et des produits de régime*. Paris, Ed. Dunod, 1 vol., 676 p.

## **L**

Lassoued, N. (2001). *Formulation et propriétés physiques d'un produit alimentaire de type mousse céréalière déformable : cas des génoises*. DEA. ENSIA, Massy. 75 p.

Li, A. et Walker, C. E. (1996). *Cake baking in conventional, impingement and hybrid ovens*. Journal of Food Science, 61(1): 188-191.

Lostie, M., Peczalski, R., Andrieu, J. et Laurent, M. (2002). *Study of sponge cake batter baking process. Part I: Experimental data*. Journal of Food Engineering, 51: 131-137.

## **M**

Manley, D. (2000). *Technology of biscuit, crackers and cookies*. Cambridge, Woodhead Publishing in Food and Technology, 499p.

Marston, P. E. et Wannan, T. L. (1976). *Bread baking. The transformation from dough to bread*. The Baker's Digest, 24-49.

Massé, H., Arquis, E., Delaunay, D., Quillet, S. et Le Bot, P. H. (2004). *Heat transfer with mechanically driven thermal contact resistance at the polymer-mold interface in injection molding of polymers*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 47: 2015-2027.

Mattil, K. F., Swern, D., Norris, F. A. et Stirton, A. J. (1964). *Bailey's industrial oil and fat products*. New York, Interscience Publishers, 1103 p.

Matz, S. A. (1972). *Bakery technology and engineering*. Westport, Avi Pub. Co., 598 p.

McFarlane, I. (1983). *Cooking processes*. In: Automatic control of food manufacturing processes. London, Applied Science Pub. Ltd., 319 p.

McFarlane, I. (1985). *On-line colour measurement and baking oven control*. Cereal foods world, 30(6): 386-388.

Mizukoshi, M. (1990). *Baking mechanism in cake production*. In: Food emulsions. K. Larsson and S. E. Friberg. New York, Marcel Dekker Inc. 479-503.

Mizukoshi, M., Kawada, T. et Matsui, N. (1979). *Model Studies of cake baking. I. Continuous observations of starch gelatinization and protein coagulation during baking*. Cereal Chemistry, 56(4): 305-309.

Mizukoshi, M., Maeda, H. et Amano, H. (1980). *Model studies of cake baking. II. Expansion and heat set of cake batter during baking*. Cereal Chemistry, 57(5): 352-355.

Morr, C. V., Hoffmann, W. et Buchheim, W. (2003). *Use of applied air pressure to improve the baking properties of whey protein isolates in angel food cakes*. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 36: 83-90.

## **P**

Pierrel, F. et Newborough, M. (2003). *Heat flux maps for ovens: concept of baking comfort zones*. ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Washington.

Pyler, E. J. (1973). *Baking science and technology*. Chicago, Siebel Pub. Co., 2 vol., 586-240.

## R

Rabiey, L. (2005). *Modélisation des transferts de chaleur dans des conserves de grosses particules en statique*. Thèse. ENSIA, Massy. 172 p.

Rask, C. et Hallström, B. (1989). *Rate of drying during baking of bread*. ICEF 5, Cologne.  
Roussel, P., Chiron, H. et Paillard, G. (2002). *Les pains français. Evolution, qualité, production*. MAE-ERTI Ed., 433 p.

## S

Sahi, S. S. et Alava, J. M. (2003). *Functionality of emulsifiers in sponge cake production*. Journal of Science of Food and Agriculture, 83: 1419-1429.

Sato, H., Matsumura, T. et Shibukawa, S. (1987). *Apparent heat transfer in a forced convection oven and properties of baked food*. Journal of Food Science, 52(1): 185-188, 193.

Savoy- Barbotteau, I. (1993). *Etude et modélisation d'un four-tunnel de biscuiterie à chauffage indirect au gaz naturel*. Thèse. ENSIA, France. 286 p.

Savoie, I., Trystram, G., Duquenoy, A., Brunet, P. et Marchin, F. (1992). *Heat and mass transfer dynamic modelling of an indirect biscuit baking tunnel-oven. Part I: Modelling principles*. Journal of Food Engineering, 16(3): 173-196.

Shibukawa, S., Sugiyama, K. et Yano, T. (1989). *Effects of heat transfer by radiation and convection on browning of cookies at baking*. Journal of Food Science, 54(3): 621-624, 699.

Skjoldebrand, C. et Andersson, C. (1989). *A comparison of infrared bread baking and conventional baking*. Journal of Microwave Power, 24(2): 91-101.

Sommier, A., Ben Yaghlane, H. et Broyart, B. (2002). *Les transferts de chaleur et de matière. Application à une mousse solide: la génoise*. Industries des céréales, 127: 12-18.

Sommier, A., Chiron, H., Colonna, P., Della Valle, G. et Rouille, J. (2005). *An instrumented pilot scale oven for the study of French bread baking*. Journal of Food Engineering, 69(1): 97-106.

Sommier, A. et Douiri, I. (2006). *Approche et compréhension des transferts de chaleur et de matière lors de la cuisson du pain*. Industries des céréales, 147: 5-10.

Standing, N. C. (1974). *Individual heat transfer modes in band oven biscuit baking*. Journal of Food Science, 39: 267-271.

Sumnu, G., Sahin, S. et Sevimli, M. (2005). *Microwave, infrared and infrared-microwave combination baking of cakes*. Journal of Food Engineering, 71: 150-155.

## **T**

Tayeb, J. (1994). *La cuisson des produits de biscuiterie-pâtisserie*. La cuisson des aliments - Rencontres AGORAL 1994. 7èmes rencontres scientifiques et technologiques des industries alimentaires, Nantes.

Tharrault, J. F. (1992). *La texture des produits de cuisson céréaliers : définition, mesures et compréhension des phénomènes*. Bulletin CTUC. 10-15.

Therdthai, N. (2003). *Modelling and optimisation of an industrial bread baking oven*. Thesis. University of Western Sydney, Sydney. 253 p.

Therdthai, N. et Zhou, W. (2003). *Recent advances in the studies of bread baking process and their impacts on the bread baking technology*. Food Science Technology Research, 9(3): 219-226.

Therdthai, N., Zhou, W. et Adamczak, T. (2004). *The development of an anemometer for industrial bread baking*. Journal of Food Engineering, 63(3): 329-334.

## **V**

Vitrac, O. et Trystram, G. (2005). *A method for time and spatially resolved measurement of convective heat transfer coefficient (h) in complex flows*. Chemical Engineering Science, 60: 1219-1236.

Voisey, P. W., Paton, D. et Larmond, E. (1979). *Apparatus for monitoring cake structure development during baking*. Cereal Chemistry, 56(4): 346-351.

## **W**

Wade, P. (1988). *Biscuits, cookies and crackers*. London, Elsevier Applied Science, 176 p.

## **Z**

Zanoni, B., Peri, C. et Bruno, D. (1995 a). *Modelling of starch gelatinization kinetics of bread crumb during baking*. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 28: 314-318.

Zanoni, B., Peri, C. et Bruno, D. (1995 b). *Modelling of browning kinetics of bread crust during baking*. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 28(6): 604-609.

Zanoni, B., Peri, C. et Gianotti, R. (1995 c). *Determination of the thermal diffusivity of bread as a function of porosity*. Journal of Food Engineering, 26: 497-510.



# 6 Annexe 1 : Cartographie thermique du four

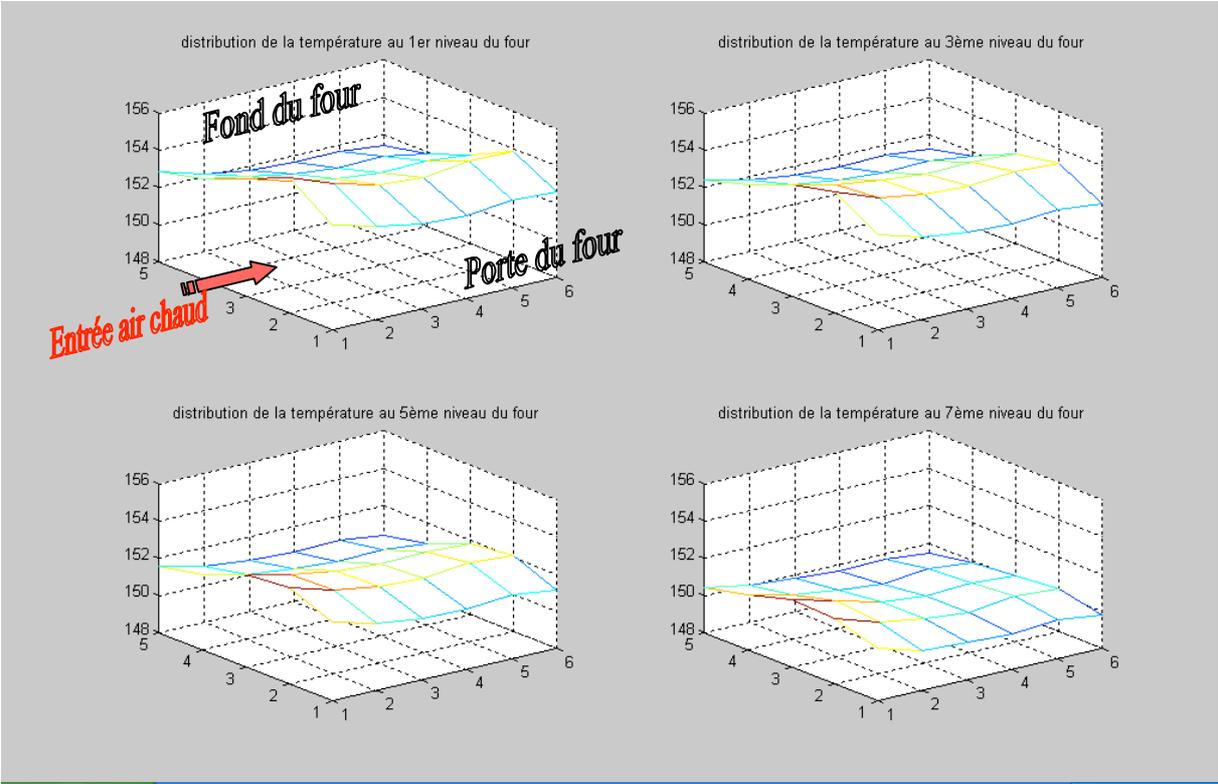


Figure 61 : Cartographie thermique du four aux 4 niveaux du four, 150°C - 25Hz

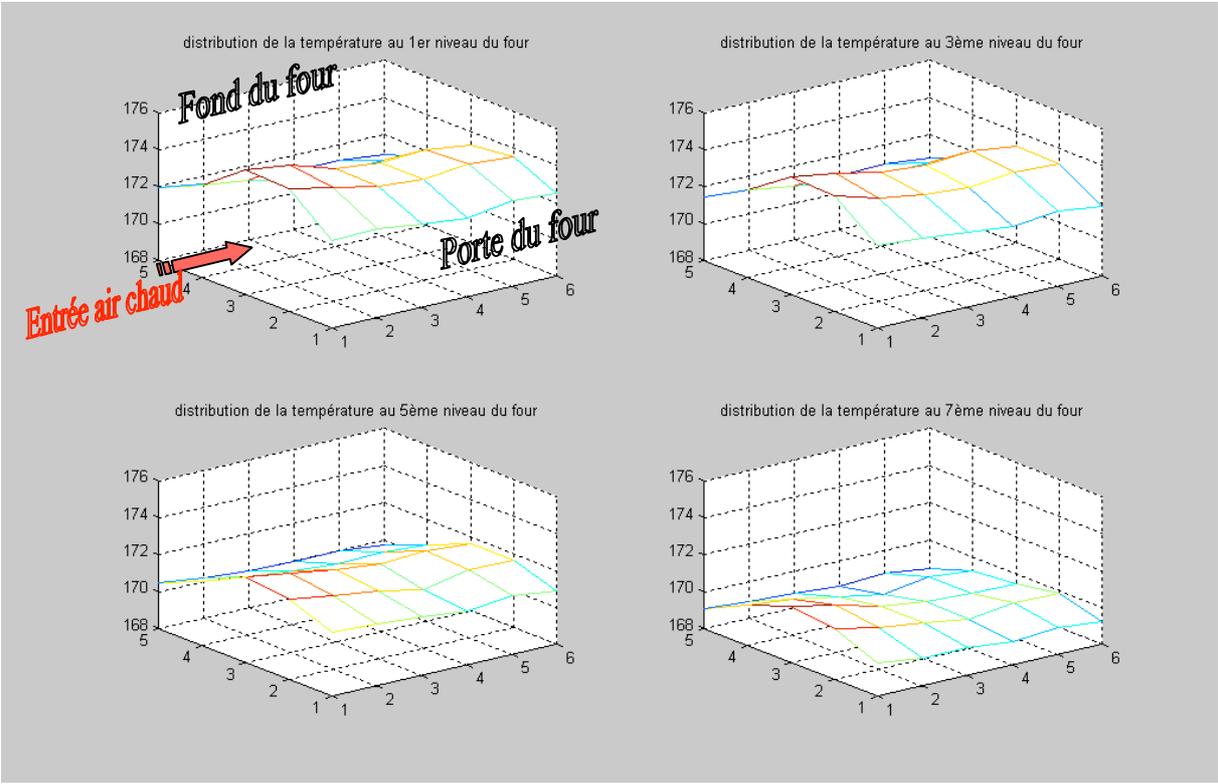


Figure 62 : Cartographie thermique du four aux 4 niveaux du four, 170°C - 25Hz

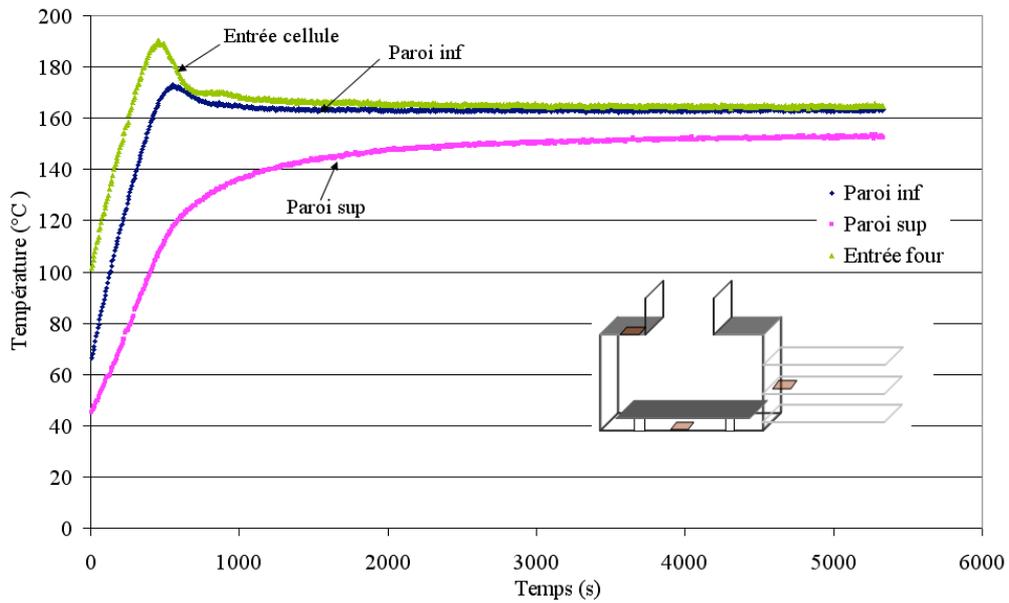


Figure 63 : Variation de la température des parois du four : supérieure, inférieure et à l'entrée de la cellule de cuisson ( $T_{\text{air}} = 160^{\circ}\text{C}$ ,  $v_{\text{air}} = 3,5 \text{ m/s}$ , mise en régime du four).

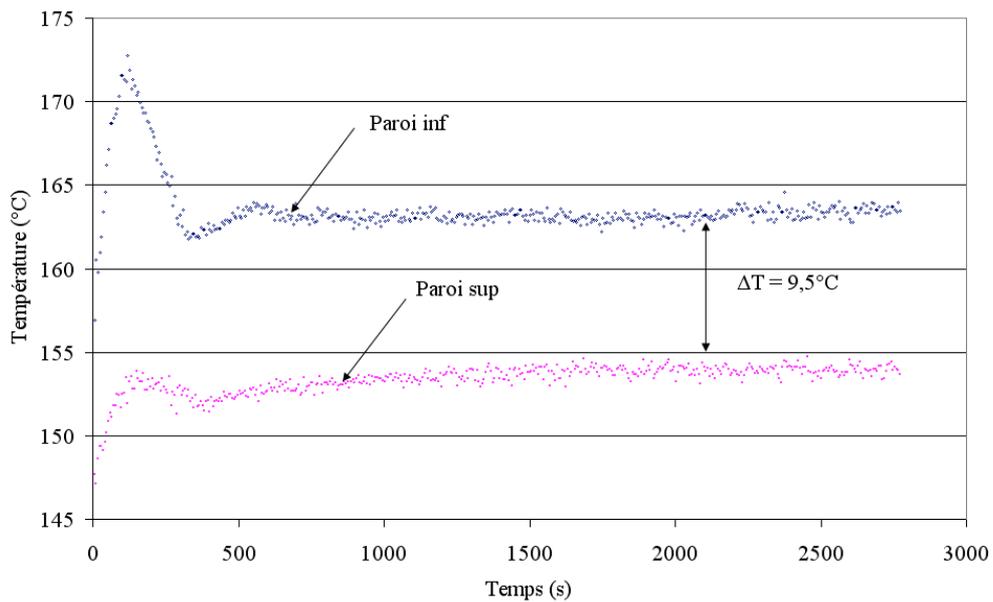


Figure 64 : Variation des températures des parois supérieure et inférieure (mesures effectuées au centre,  $T = 160^{\circ}\text{C}$   $V = 3,5 \text{ m/s}$ , mesure effectuée après ouverture et fermeture de la porte).

## 7 Annexe 2 : Détermination de l'émissivité de la génoise

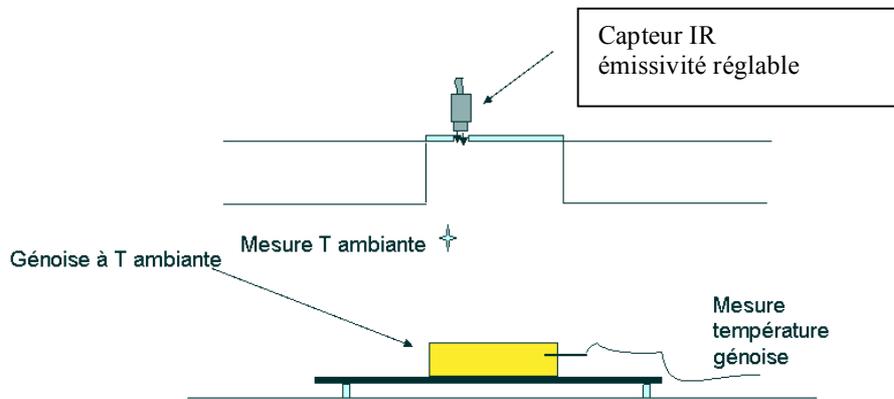


Figure 65 : Détermination de l'émissivité de la génoise

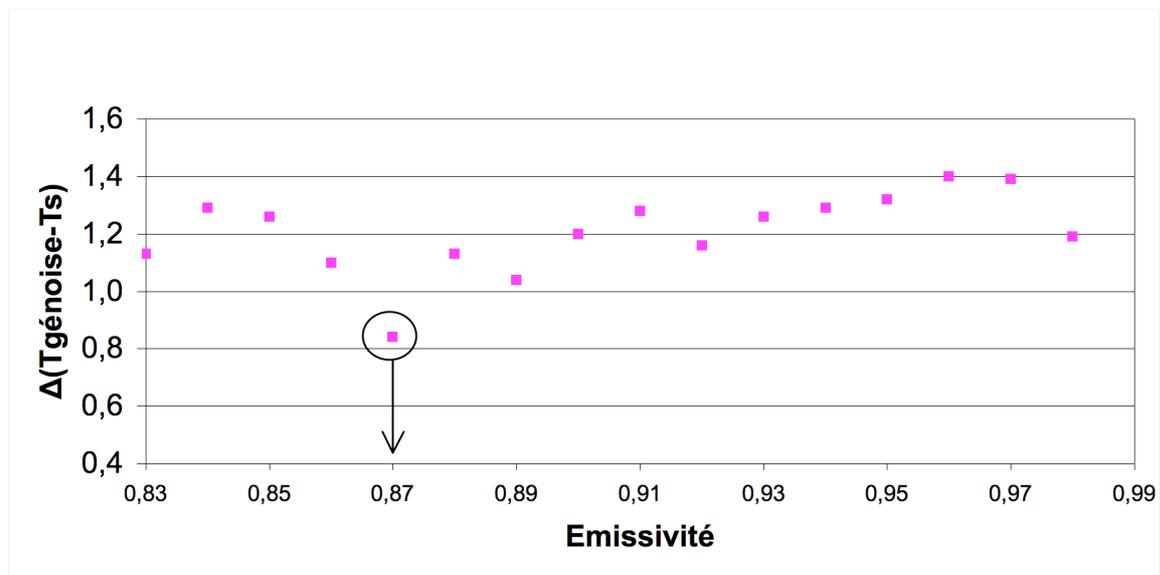


Figure 66 : Ecart entre max et min de la température de la génoise et de la température de la surface en fonction de l'émissivité



## 8 Publications et communications

### Book sections

- Douiri I., Sommier A. et Duquenoy A. (2003). Réalisation d'un four instrumenté et application à l'étude de la cuisson du pain français. In *Du rayonnement scientifique à la diffusion des technologies - Actes du 9° Congrès SFGP (9-11 septembre 2003, Saint-Nazaire, France)*. [CD-ROM]. J. Legrand, Ed. Nancy, France: Société Française de Génie des Procédés, 90. 413.
- Sommier A. et Douiri I. (2003). Un four piloté sous contrôle : de la mesure au contrôle du procédé. In *FuturVIEW'2003 - Actes des Premières Journées Francophones sur la Programmation Graphique pour la Mesure et l'Automatisation avec le langage LabVIEW TM (12-13 juin 2003, Site du Futuroscope, France)*. ENSMA, Ed. ENSMA, Site du Futuroscope: ENSMA, LISI. 47-52.
- Douiri I., Dumoulin E., Sommier A. et Trystram G. (2004). Cooking of frozen croissants. In *ICEF 9 - International Congress on Engineering and Food (7-11 mars 2004, Montpellier, France)*. [CD Rom]. J.J. Bimbenet et G. Trystram, Eds. Paris, France: SCI. 432-436.
- Douiri I., Chipeaux C., Dumoulin E., Sommier A. et Trystram G. (2005). Instrumentation d'un four pour la cuisson de génoise. In *Actes du 10° Congrès SFGP. Le génie des procédés vers de nouveaux espaces 20-20 septembre 2005, Toulouse, France*. [CD-ROM]. Ed. Paris: Lavoisier. Récents progrès en Génie des procédés, 92. Q15 8 p.

### Proceedings

- Douiri I., Sommier A. et Duquenoy A. (2003). Réalisation d'un four instrumenté et application à l'étude de la cuisson du pain français. *JSTA'2003 - 1ère Journée Scientifique et technologique de l'Agroalimentaire, 8 avril 2003, Tunis, Tunisie*. I.N.d.S.A.e.d. Technologie, Ed. INSAT et ESIAT 90-98.
- Douiri I., Dumoulin E., Sommier A. et Trystram G. (2006). Determination of density variation during sponge cake baking. *Food is life - IUFoST 13th World Congress of Food Science & Technology. [CD-Rom], 17-21 september 2006, Nantes, France*. (Poster).

### Journal articles

- Douiri I., Sommier A. et Duquenoy A. (2003). Le pain sous haute surveillance. *Industries des Céréales* (131), 16.
- Sommier A. et Douiri I. (2006). Approche et compréhension des transferts de chaleur et de matière lors de la cuisson du pain. *Industries des Céréales* (147), 5-11.





## Résumé

La cuisson de produits céréaliers provoque des transformations physicochimiques dans la pâte pour lui conférer une structure, une texture, une forme, une couleur et un goût désirés. Un four pilote électrique avec circulation d'air chaud a été instrumenté pour suivre en continu la cuisson d'un produit type génoise (700g) placé dans un moule : perte de poids, profil de température interne et température de surface, pression interne. A travers une fenêtre dans la paroi isolée du moule des images ont été enregistrées pour suivre le gonflement. L'évolution de masse volumique a été déduite. Des mesures de flux de chaleur radiatif et convectif reçus par la surface du produit ont contribué à expliquer la coloration de la surface et la forme du produit cuit. Des cuissons à 160, 180, 220°C ont été réalisées avec une perte de masse constante (eau) de 6% durant la période de chauffage, avec des temps de chauffage respectivement de 81, 71, 52 min. Durant cette période la pâte se transforme en croûte colorée sèche en surface, et mie humide. La période de refroidissement contrôlé avec ventilation d'air (90min) conduit à une perte additionnelle de poids de 6% et représente une phase importante pour stabiliser la structure.

**Mots-clés :** cuisson, génoise, instrumentation, analyse d'image, masse volumique, refroidissement, four.

## Abstract

Baking of cereal products create physicochemical reactions in the dough creating the structure, the texture, the shape, the colour and taste of the final product. An air convective electrical pilot oven was instrumented to control on-line the baking of a sponge cake product (700g) in a special mould: weight loss, internal temperature profile and surface temperature, internal pressure; Through a glass window in the isolated lateral side of the mould, images were taken to follow the product height variation. The evolution of density along baking was calculated. Radiative and convective heat flux measurements were used to explain the surface coloration and the shape of the baked cake. Trials with air temperatures of 160, 180 and 220°C were performed with a constant weight loss of 6% (water) during the heating period, corresponding to different heating durations of 81, 71 and 52 min respectively. During this period the dough was transformed in the dry coloured crust and still humid crumb. The controlled cooling period with blowing of cold air (90 min) represented, with an additional weight loss of 6%, an important contribution to stabilize the structure.

**Keywords:** baking, sponge cake, image analysis, instrumentation, density, cooling, oven.