



## Optimisation des traitements thermiques

### Les traitements thermiques à température variable : optimisation par la simulation numérique. Applications aux foies gras

Ecrit par : Housseem ABIDI ; Rubén ZUNIGA ; Nicolas LEHEBEL ; François ZUBER<sup>(1)</sup> (Centre Technique de la Conservation des Produits Agricoles et Albert DUQUENOY et Francis COURTOIS (AgroParisTech, centre de Massy)

(1) pour tout contact : François Zuber, CTCPA, Site Agroparc, ZA Aéroport, BP 21203 , 84911 Avignon cedex 9 ; [fzuber@ctcpa.org](mailto:fzuber@ctcpa.org)

#### Résumé :

Le traitement thermique de pasteurisation ou de stérilisation des produits préemballés est classiquement réalisé avec des barèmes à température constante dans l'ambiance de l'autoclave. Ces traitements, même optimisés en température et en durée, provoquent des différences importantes de cuisson entre la périphérie et le centre de certains produits, et généralement une cuisson globale inutilement excessive, notamment pour les produits à caractère conducteur, tels que les foies gras, connus pour être des produits particulièrement sensibles. Les Traitements Thermiques à Température Variable peuvent apporter des améliorations qualitatives (cuisson, texture, saveur, couleur..) et/ou économiques (par la minimisation de la durée totale du cycle d'appertisation). Le CTCPA, en collaboration avec AgroParisTech, a développé des outils logiciels utilisant la modélisation et la simulation numérique des traitements thermiques, logiciels qui autorisent une optimisation itérative multicritères des barèmes. Le logiciel STÉRI'OPT® a été utilisé pour calculer et proposer des traitements thermiques à température variable, adaptés au foie gras et pour différents conditionnement. Ces cycles thermiques optimisés respectent la Valeur Pasteurisatrice ou Stérilisatrice à cœur souhaitée, avec une réduction de la Valeur Cuisatrice appliquée aux produits, par rapport aux barèmes classiques de références.

**Les Traitements Thermiques à Température Variable, calculés avec le logiciel STÉRI'OPT® du CTCPA - AgroParisTech, autorisent une optimisation des barèmes de pasteurisation ou de stérilisation, sur le critère de la Valeur Cuisatrice apportée au produit, sans concéder à la sécurité sanitaire imposée.**

#### Introduction

Les traitements thermiques d'appertisation ou de pasteurisation couramment appliqués, peuvent être décrits comme la succession de quatre phases : une phase de « Come Up Time » (CUT) consistant d'un délai de montée de la température de l'enceinte, jusqu'à la température de régime (Tr), suivie d'une phase de palier chaud durant laquelle la température de régime est maintenue constante, puis une phase de « Come Down Time » (CDT) consistant d'un délai de descente de la température de l'autoclave jusqu'à la température de l'eau de refroidissement, suivi d'un palier de refroidissement jusqu'à l'obtention de la température à cœur désirée.

Les traitements thermiques à température constante présentent des désavantages, notamment pour les produits à caractère conducteur où la chaleur se propage de proche en proche, et les méthodes d'optimisation de ces traitements présentent des limites. Les barèmes ainsi calculés sont souvent un peu excessifs et sous estiment l'inertie thermique des produits au refroidissement. De plus, les barèmes à palier constant induisent toujours une inutile surcuisson périphérique

des produits conductifs. Ce sont là les inconvénients des barèmes à température constante, particulièrement ceux calculés par la méthode de Ball. Après un traitement thermique à température constante, ces produits présentent une forte hétérogénéité de cuisson entre le centre et la périphérie, affectant ainsi les caractéristiques organoleptiques du produit qui devraient être préservés.

Un procédé qui permet d'améliorer l'uniformité de la pénétration de la chaleur dans un produit conducteur apporte beaucoup d'avantages par rapport aux barèmes classiques en termes de qualité, de temps total et de consommation énergétique. Une des solutions proposées consiste à remplacer les paliers à température constante par des phases à température variable (Teixeira et al. 1969 ; Teixeira et al., 1975 ; Saguy et al., 1979).

Les Traitements Thermiques à Température Variable (TTTV) ne peuvent toutefois pas être calculés au moyen de méthodes traditionnelles.

Les premiers résultats prometteurs sur les traitements thermiques à température variable, ont été obtenus durant les années 1990 (Banga et al., 1991 ; Noronha et al., 1996 ; Basset et al., 1997 ; Almonacid-Merino et al., 1993 ; Noronha et al., 1993), pour améliorer des critères comme la cuisson en surface ou le temps total. Les traitements à température variable mentionnés dans la littérature sont majoritairement constitués de rampes linéaires de chauffage et de refroidissement (Durance, 1997 ; Durance et al., 1996).

Le CTCPA a réalisé une étude en collaboration avec AgroParisTech, dans le cadre d'un travail de thèse, afin de rechercher, et d'établir, en se basant à la fois sur la simulation numérique et l'expérimentation, une méthodologie de recherche des TTTV qui permettront d'améliorer la qualité des produits appertisés en termes d'uniformité de la cuisson et des propriétés organoleptiques qui en résultent. Ce projet a reçu le soutien de FranceAgriMer.

## Notions de valeur stérilisatrice, pasteurisatrice et cuisatrice

La qualité organoleptique des produits à base de foie gras appertisé est étroitement liée aux conditions du traitement thermique (barème de stérilisation). Empiriquement, il est constaté un antagonisme entre le traitement thermique « élevé » nécessaire pour garantir la stabilité du produit et le résultat sensoriel des produits foie gras (Basset et al., 1997 ; Sobczak et Cordier, 2004). La maîtrise du traitement thermique est donc un paramètre primordial pour garantir les qualités organoleptiques du foie gras appertisé.

Afin de permettre une comparaison facile de l'effet létal de différents traitements thermiques, la notion de Valeur Stérilisatrice (VS) a été introduite comme une « échelle d'intensité de traitement thermique ».

Par définition, la VS est une durée de traitement thermique, exprimée en minutes, à une température de référence (Tref) qui permet la destruction d'une certaine quantité de micro-organismes cibles dont les caractéristiques de thermorésistance sont connues.

Pour la stérilisation, la température de 121,1°C est retenue comme référence internationale et le germe de référence est *Clostridium botulinum* pour lequel le paramètre d'activation thermique (Z) est 10°C.

## Conception et étude comparative de profils de traitement à température variable

A partir des données collectées dans l'étude bibliographique préalable, il nous a été possible de concevoir par simulation numérique trois profils types de barèmes à températures variables, pouvant être comparés dans différentes configurations, à des barèmes de référence à deux paliers, et cela afin de

La bibliographie a révélé des types de profils à température variable simples et réalisables industriellement. Les auteurs s'accordent presque tous à centrer l'intérêt de ces traitements sur l'amélioration de la cuisson de la surface ou la minimisation du temps total.

Ils s'accordent à dire que ces profils ne permettent pas un grand apport pour la maximisation d'un taux de rétention des nutriments. Mais, ceci est une conclusion qui reste à vérifier, compte tenu que les recherches ne se sont pratiquement intéressées qu'au cas de destruction de la thiamine.

Dans cet article, nous présentons le concept de TTTV, les travaux de mise au point ayant abouti au logiciel de calcul et d'optimisation de traitements thermiques STERI'OPT®, et l'application de ce logiciel dans l'optimisation de barèmes de stérilisation ou pasteurisation à température variable, adaptés au foie gras.

$$VS = \int_0^{t_{final}} 10^{\frac{T(t)-T_{ref}}{Z}} dt \quad (1)$$

Par analogie, une valeur pasteurisatrice (VP) est exprimée, avec la même formule que celle de la VS, pour quantifier les traitements thermiques de pasteurisation de produits non acides, dont la Tref est 70°C et Z est 10°C.

Mais, au-delà de l'effet de stérilisation ou pasteurisation, les procédés d'appertisation provoquent des modifications des qualités nutritionnelles et organoleptiques des produits alimentaires (Basset et al., 1997 ; Sobczak et Cordier, 2004). Ces modifications qualitatives, survenant en fonction du temps et de la température, sont décrites, en analogie avec la VS et VP, par la valeur cuisatrice (VC) dont la Tref est 100°C et la valeur d'activation thermique Z est généralement comprise entre 15 et 40°, avec une valeur moyenne usuelle de Z = 25°C valeur choisie pour refléter la dégradation thermique due à la cuisson, des qualités organoleptiques : couleur – notamment brunissement de Maillard, perte de texture, ou nutritionnelles : dégradation des vitamines (Ohlsson T. 1979).

Ces grandeurs sont utilisées pour caractériser l'intérêt qu'apportent les TTTV pour la stabilisation des produits.

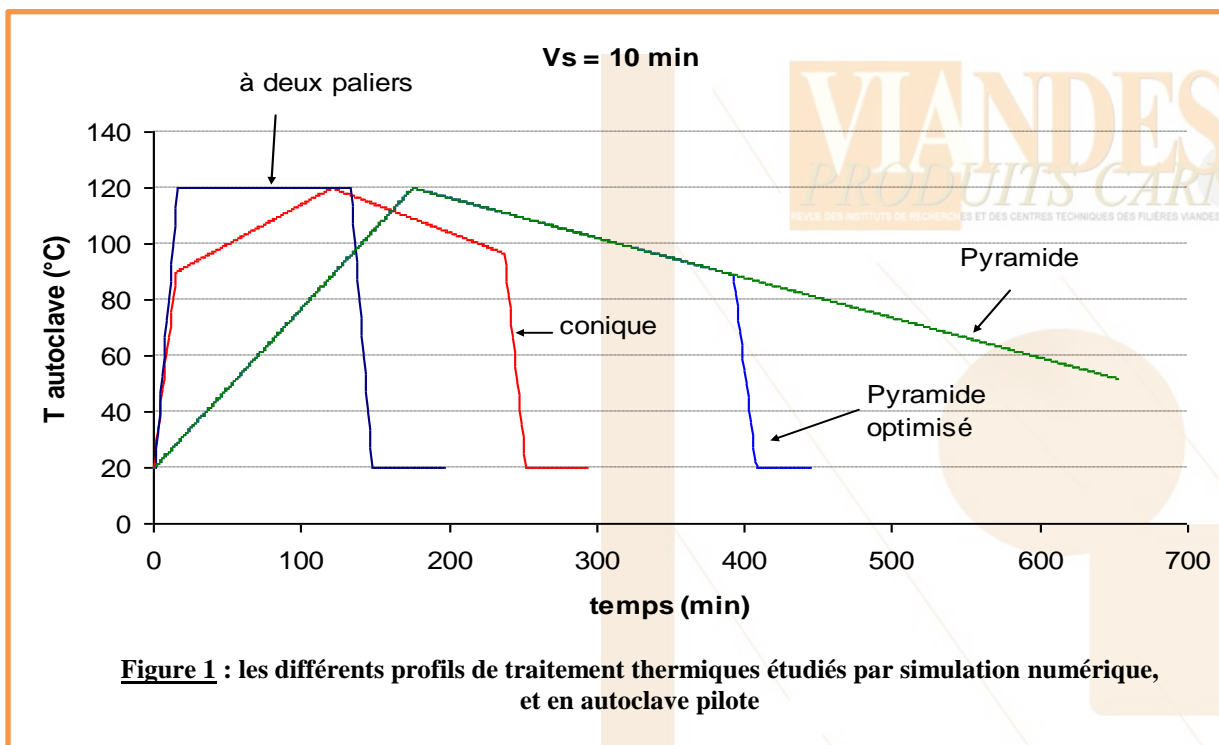
vérifier les prédictions de la simulation (Chen and Ramaswamy, 2002 ; Lihan Huang, 2007a et 2007b).

Ces trois types de profils ont été baptisés « profil pyramide », « profil pyramide optimisé » et « profil conique ».

La Figure 1 présente les différents profils étudiés, par exemple pour une Valeur Stérilisatrice de 10 min obtenue à cœur :

- ✓ **Profil pyramide :** il s'agit d'une rampe linéaire de chauffage de la température initiale ( $T_i$ ) de l'autoclave jusqu'à une température maximale ( $T_b$ ) suivi d'une rampe linéaire de refroidissement et éventuellement d'un palier à la température de l'eau de refroidissement de l'autoclave pour obtenir la température désirée à cœur du produit ( $60^\circ\text{C}$ ) à la fin du traitement.

- ✓ **Profil pyramide optimisé :** Ce profil se différencie du profil pyramide par une accélération du refroidissement grâce à une deuxième rampe de refroidissement rapide d'une durée de 15 min.
- ✓ **Profil conique :** Ce profil est composé de deux rampes linéaires de chauffage et deux autres de refroidissement suivies éventuellement d'un palier à la température de l'ambiance de l'autoclave pour l'obtention de la température finale désirée à cœur du produit ( $60^\circ\text{C}$ ).



Les différentes simulations ont été réalisées grâce au logiciel *Armor Ensia* et à des programmes écrits en VB.Net. Ces programmes résolvent par différences finies (méthode explicite) l'équation de diffusion de la chaleur en tout point du produit, et estiment en fonction du temps l'évolution de la température et des valeurs stérilisatrices et cuisatrices.

La température initiale du produit, ainsi que celle de l'autoclave au début et à la fin d'un essai, ont été considérées égales à  $20^\circ\text{C}$ .

La simulation permet de faire varier facilement les principaux paramètres tels que la température maximale de l'autoclave, la valeur stérilisatrice atteinte à cœur, etc...

La simulation a été réalisée sur une géométrie cylindrique (boîte 1/1) pour un produit modèle compact conducteur (purée de pomme de terre) dont les caractéristiques physiques ont été déterminées expérimentalement : conductivité thermique, capacité calorifique, etc. (Magee, 1995). Les paramètres adoptés pour la simulation figurent dans le Tableau 1.

Les barèmes de références classiques à deux paliers, pour la comparaison de performances, ont été générés par simulation et sont présentés dans le Tableau 2.

**La grandeur RVC est le rapport de Valeur cuisatrice entre périphérie et cœur, et reflète l'homogénéité de l'impact de cuisson.**

**Tableau 1 : Les valeurs des paramètres thermiques nécessaires pour la simulation numérique**

$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\rho C_p$ (kJ.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup> )	$h_{\text{chauffage}}$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	$h_{\text{refroidissement}}$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	$T_{\text{réf.s}}$ (°C)	$T_{\text{réf.c}}$ (°C)	$Z_s$ (°C)	$Z_c$ (°C)
0,645	3982	1200	600	121,1	100	10	25

Avec :

- $\lambda$  (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) : Conductivité thermique du produit
- $\rho C_p$  (kJ.m<sup>-3</sup>.K<sup>-1</sup>) : Chaleur volumique spécifique du produit
- $h$  (W/m<sup>2</sup>.°C) : Coefficient d'échange thermique en paroi externe des emballages

Les grandeurs  $\lambda$  et  $\rho C_p$  sont mesurées à l'aide d'un CT mètre, appareil de mesure de la conductivité thermique (Technical Electronics Photoengraving, Meylan, France). Les coefficients  $h$  sont estimés par calcul et données bibliographiques pour une ambiance vapeur ou eau surchauffée en ruissellement. La nature du fluide chauffant n'intervient que pour une fraction négligeable, en boîtes métalliques, devant la résistance thermique du produit lui-même. Un coefficient moyen unique a donc été utilisé après différentes simulations.

**Tableau 2 : Exemples de profils de référence à deux paliers pour le produit modèle**

Tb	VS à cœur = 10 min			VS à cœur = 30 min	
	105°C	120°C	135°C	120°C	135°C
RVC	1,17	2,95	9,17	2,10	6,61
VC en périphérie (min)	834	714	1643	959	1913
VC à cœur (min)	713	242	179	455	289
VC moyenne (min)	759	420	637	654	827
Temps total (min)	603	196	151	236	164
Temps de chauffage (min)	544	132	85	171	96

**Tableau 3 - Résultats prévus par la simulation (exemple d'une VS = 10 min)**

Profil	A deux paliers	Pyramide	Pyramide optimisée	Conique
Temps total (min)	196	654 (+234%)	446 (+128%)	294 (+50%)
Temps de chauffage (min)	132	175 (+33%)	175 (+33%)	120 (-9%)
VS à cœur (min)	10,3	10,1	10,1	10,1
VC à cœur (min)	242	457 (+89%)	419 (+73%)	350 (+45%)
VC en périphérie (min)	714	586 (-18%)	560 (-22%)	519 (-27%)
RVC	2,95	1,28 (-57%)	1,33 (-55%)	1,48 (-50%)
VC moyenne (min)	420	510 (+21%)	479 (+14%)	422

Le Tableau 3 présente les résultats comparés (caractéristiques, performances) des différents profils prévus par la simulation, dans le cas, donné en exemple, d'une VS de 10 min à cœur.

La vérification expérimentale sur le produit modèle permet de valider de façon satisfaisante les prédictions du modèle, en particulier la mesure directe de l'impact de cuisson, par la mesure de la Valeur Cuisatrice et par la mesure du brunissement du produit au colorimètre (en différents points du produit).

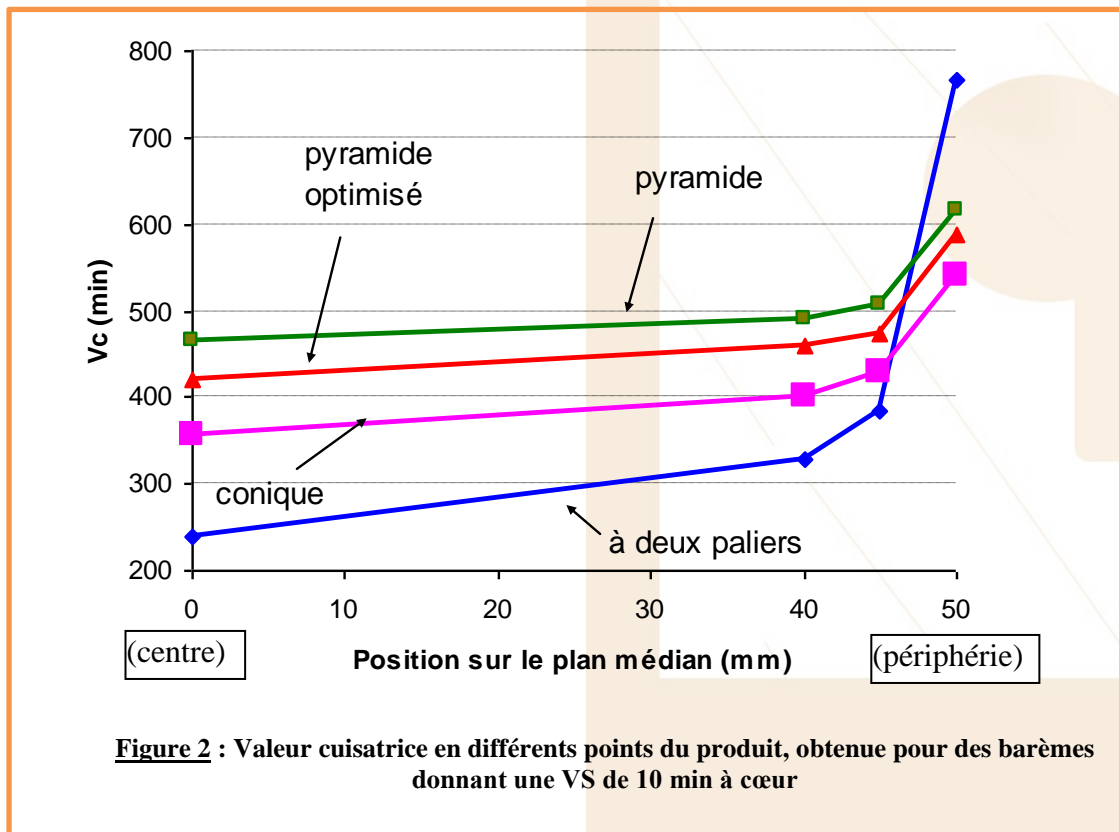
Les profils pyramide et pyramide optimisés sont les profils qui assurent la meilleure uniformité de la cuisson, mais au prix d'une augmentation de la valeur cuisatrice moyenne dans l'ensemble du produit. De plus, ils ne sont pas adaptés à la réalité industrielle, puisqu'ils nécessitent un temps total de traitement beaucoup plus important que pour les profils à deux paliers actuellement utilisés.

Le profil conique présente un intérêt particulier : Il permet de baisser très significativement la surcuisson en périphérie (-27%) et d'améliorer ainsi l'uniformité

*de la cuisson (RVC passe de 2,95 à 1,48 dans notre exemple) sans augmenter de façon notable la cuisson moyenne du produit, et ce avec une augmentation du temps total de cycle, qu'il est possible de limiter par une optimisation plus approfondie. En revanche, la durée de la phase de chauffage peut diminuer légèrement.*

Dans notre recherche de profils à température variable réalisables, et en se basant sur les résultats de la simulation pour les trois valeurs stérilisatrices, il semble, que, parmi les trois types de barème à température variable, le barème conique est le mieux adapté pour assurer un compromis entre une amélioration de la qualité et les contraintes industrielles. Il améliore significativement tous les indicateurs de qualité de la cuisson (hétérogénéité de la cuisson, surcuisson de la périphérie) en freinant le moins le rythme de la production (temps total le plus faible).

Sur les Figures 2 et 3 sont présentées les répartitions de la valeur cuisatrice (VC) et de la luminance L\* absolue sur le plan médian du produit.



## Optimisation du modèle de transfert par simulation par rapport aux données expérimentales

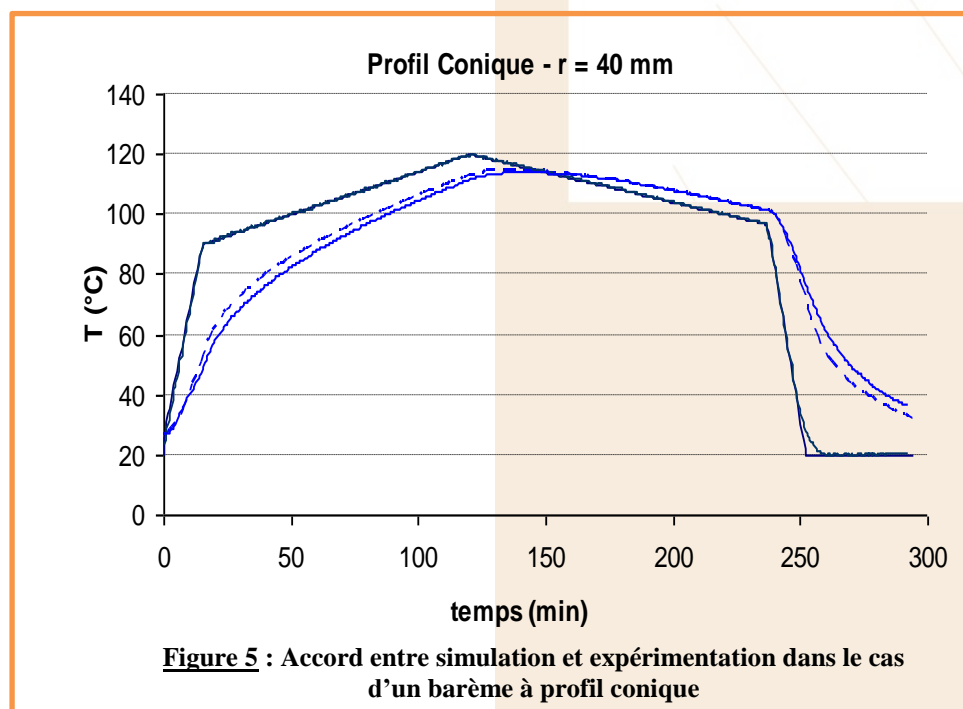
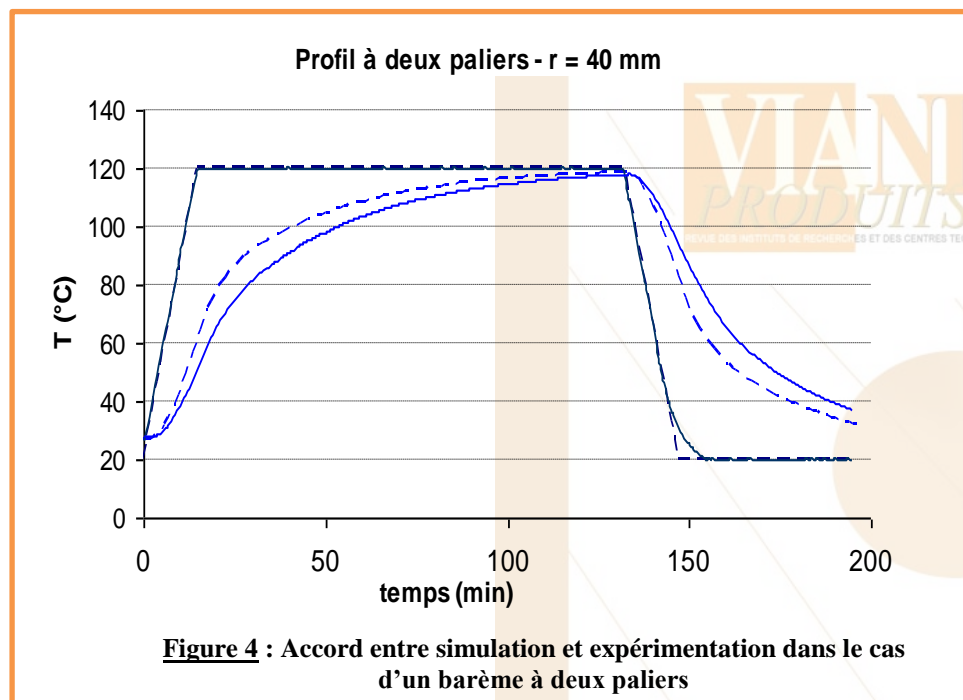
Les Figures 4 et 5 illustrent à titre d'exemple l'évolution de la température expérimentale (*trait continu*) et celle que prédit la simulation (*trait interrompu*) en  $r = 40$  mm, pour deux des essais réalisés.

D'une manière générale, l'accord simulation-expérience est suffisant pour tester des stratégies de recherche de barèmes alternatifs.

L'accord est meilleur à cœur du produit où le gradient de température est faible. Le décalage est plus accentué en périphérie du produit et d'autant plus important que la variation de la température de l'ambiance est rapide.

Une inexactitude des valeurs de la diffusivité thermique ou des coefficients d'échange de la chaleur accentue ces écarts quand la variation de la température de l'ambiance est importante.

Ces valeurs doivent être ajustées afin d'améliorer les prédictions. Le grand nombre d'essais expérimentaux réalisés a permis la réalisation de ces ajustements, en utilisant une méthode numérique appropriée pour définir les valeurs des paramètres minimisant la somme des carrés des écarts entre les températures simulées et expérimentales.



## Intérêt et exploitation des simulations numériques pour le calcul de barèmes optimisés de type traitement thermique à température variable.

Dans la configuration présentée, le profil conique (Figure 6) n'est pas totalement optimisé.

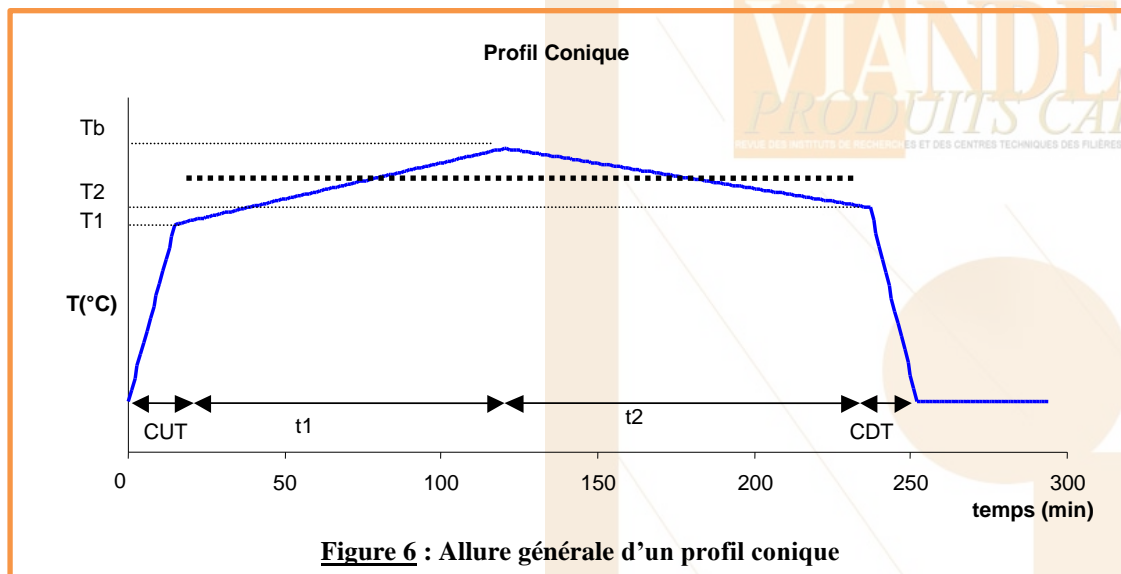
La recherche d'une configuration optimale (répartition et paramétrage des différentes phases) permet de le rendre encore plus performant, avec le souci de limiter autant que possible la durée totale de cycle. **En particulier, le dépassement volontaire de la température atteinte au maximum  $T_b$  (pour une durée limitée) dans l'autoclave - par rapport à une température maintenue longtemps élevée dans le cas d'un profil à deux paliers (ligne pointillée) permet une optimisation intéressante.**

Pour un CUT, un CDT et une température maximale  $T_b$  fixés, la recherche d'un profil conique optimal

revient à chercher la meilleure combinaison des variables ( $t_1$ ,  $T_1$ ,  $t_2$ ,  $T_2$ ).

Une méthode d'optimisation (complexe de Box) a été appliquée pour minimiser une fonction objective dépendant de ( $t_1, T_1, t_2, T_2$ ). Cette fonction peut être par exemple la Valeur Cuisatrice en périphérie, le rapport R<sub>Vc</sub> ou la Valeur cuisatrice Moyenne, la durée de chauffage, ou la durée totale de cycle (Pontryagin et al., 1962 ; Dou et al., 1993 ; Erdoğan et al. 2003 ; Box, 1965)

*Cette démarche a permis la conception du logiciel STÉRI'OPT<sup>®</sup> qui a été utilisé pour proposer l'optimisation de barèmes d'appertisation ou de pasteurisation de produits de foies gras.*



## Application des traitements thermiques à température variable, à l'optimisation des cycles de pasteurisation ou d'appertisation des produits à base de foie gras

**Méthodologie :** En se basant sur la géométrie du produit conditionné, le logiciel STÉRI'OPT<sup>®</sup> crée un maillage tridimensionnel serré de points dans tout le volume. A partir du profil de température dans l'autoclave, il calcule ensuite la courbe de pénétration de chaleur à cœur et en périphérie, en résolvant l'équation de diffusion de la chaleur par la méthode des différences finies, dans tout le volume du produit.

La vitesse de pénétration de chaleur dans un couple « emballage/produit » peut être mesurée et exprimée au moyen de deux grandeurs classiques dans les métiers de la conserverie : la valeur fh et la valeur j (Ball et Olson, 1957).

« fh » (en minutes), exprime la « vitesse » de pénétration de la chaleur dans un couple emballage/produit donné. Elle est reliée à la fois aux caractéristiques de diffusion de chaleur par transferts conductif et/ou convectif et à la géométrie de l'emballage.

« j » (sans dimension), est une caractéristique intrinsèque du produit. Elle permet de déterminer le mode de transfert de la chaleur au sein du produit.

De faible valeur, elle indique un transfert de type convectif, (j est alors proche de 1), la valeur maximale de « j » est obtenue pour des produits conductifs (j se rapproche de 2) ; c'est le cas du foie gras.

La détermination expérimentale des paramètres de pénétration de chaleur (PPC) « fh » et de « j » est basée sur une mesure de la température au point critique du produit, en conditions contrôlées, suivie d'un traitement particulier des données : méthode semi-analytique de Ball (Ball et Olson, 1957). Cependant, la détermination des paramètres de pénétration de chaleur reste difficile (sélection de points alignés, application d'une régression linéaire, répétitions des essais...) et imprécise (Duquenoy, 1991 ; Zuber et al., 2008).

**Produit modèle :** Le produit modèle est le foie gras. Le produit est conditionné dans des boîtes métalliques cylindriques de différents formats.

**Approche d'optimisation** : Au cours de l'optimisation avec le logiciel STERI'OPT®, différentes barèmes sont testés, l'optimisation consiste en la minimisation de la VC du produit et la minimisation de la durée du traitement, en respectant une contrainte microbiologique à cœur (VS ou VP) et une contrainte sur la température finale à cœur du produit ( $T_{\text{cœur}}$ ) en fin de refroidissement. L'algorithme d'optimisation utilise une méthode stochastique.

**Résultats obtenus sur les produits à base de foie gras** : Pour pouvoir juger du bénéfice éventuel des

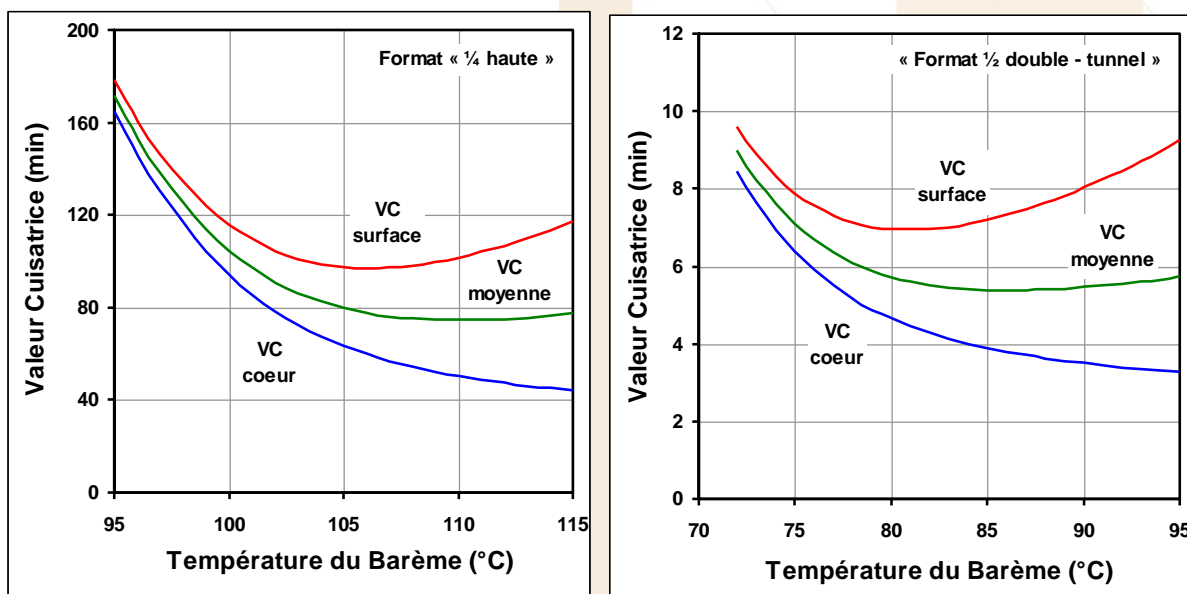
barèmes à température variable, il est nécessaire de les comparer à des barèmes à température constante. Deux formats de boîtes de conserve ont été étudiés (voir Tableau 4) : une boîte métallique cylindrique format ¼ haute et une boîte métallique cylindrique format ½ double « tunnel ». Concernant les paramètres des traitements thermiques, trois paramètres sont communs aux deux exemples analysés ; la température initiale d'autoclave est de 20°C, la température de l'eau de refroidissement de 15°C et la température à cœur du produit en fin de refroidissement est fixée à 40°C.

**Tableau 4** : Caractéristiques des produits à base de foie gras et des formats étudiés

Produit	Format de l'emballage	Diamètre et hauteur (mm)	P.P.C.	Traitement thermique
Foie gras entier	Boîte cylindrique ¼ haute	Ø=55 h=97	fh = 33,5 min j = 2,0	Stérilisation VS = 0,6 min
Bloc de foie gras avec morceaux	Boîte cylindrique ½ double « tunnel »	Ø=73 h=260	fh = 45 min j = 1,8	Pasteurisation VP = 150 min

La Figure 7 montre les profils de valeur cuisatrice, déterminés par STERI'OPT®, pour une température de barème constante. L'optimum de température

d'ambiance permettant de réduire la valeur cuisatrice en surface et moyenne se trouve dans la plage 105-110°C pour la stérilisation et 80-85°C pour la pasteurisation.



**Figure 7** : Profils de valeur cuisatrice déterminés par STERI'OPT®, pour des traitements à température de barème constante

Le Tableau 5 présente les barèmes à température constante, déterminés par STERI'OPT®, pour une stérilisation à 105°C et pour une pasteurisation à 80°C qui permettent d'obtenir une valeur stérilisatrice et une valeur pasteurisatrice voisine de 0,6 et de 150 min

respectivement. Le Tableau 6 montre la valeur cuisatrice à cœur, en surface et moyenne pour les deux traitements thermiques analysés, à température constante. Ces valeurs cuisatrices servent de référence pour le calcul d'améliorations possibles.



**Tableau 5 : Barèmes à température constante déterminés par STERI'OPT®**

Phase	Stérilisation « Format ¼ haute »		
	T début (°C)	T fin (°C)	Durée (min)
CUT	20	105	10,00
Palier chaud	105	105	66,16
CDT	105	15	20,00
Palier froid	15	15	17,35
Temps total			113,51
Phase	Pasteurisation « Format Tunnel »		
	T début (°C)	T fin (°C)	Durée (min)
CUT	20	80	12,00
Palier chaud	80	80	47,61
CDT	80	15	16,25
Palier froid	15	15	11,84
Temps total			87,70

**Tableau 6 : Valeurs cuisatrices calculées pour les barèmes de référence à température constante**

Format / traitement	Valeurs cuisatrices		
	Cœur (min)	Surface (min)	Moyenne (min)
¼ haute / appertisation	63,27	97,43	79,74
Tunnel / pasteurisation	4,65	6,95	5,72

La détermination de barèmes à température variable a été conditionnée par différentes configurations d'optimisation. Le terme « pondéré » signifie que le logiciel recherche éventuellement un double optimum (c'est-à-dire « le meilleur compromis possible »), entre VC en surface et VC moyenne dans tout le volume, par exemple. Le ratio de poids relatif de chaque critère est choisi par l'utilisateur. Chaque critère d'optimisation peut être assorti d'un coefficient de pondération entre 0 et 100% (par exemple : Cuisson périphérique 50% et durée totale 50% (cette dernière combinaison étant particulièrement intéressante pour l'industriel.

(b) minimisation VC en surface et VC moyenne pondérée à 50% chacune ;

(c) minimisation VC surface pondérée à 100% ;

(d) minimisation VC moyenne pondérée à 100% ;

(e) minimisation VC surface pondérée à 100% et contrainte imposée VC moyenne  $\leq$  VC moyenne déterminée à température constante ;

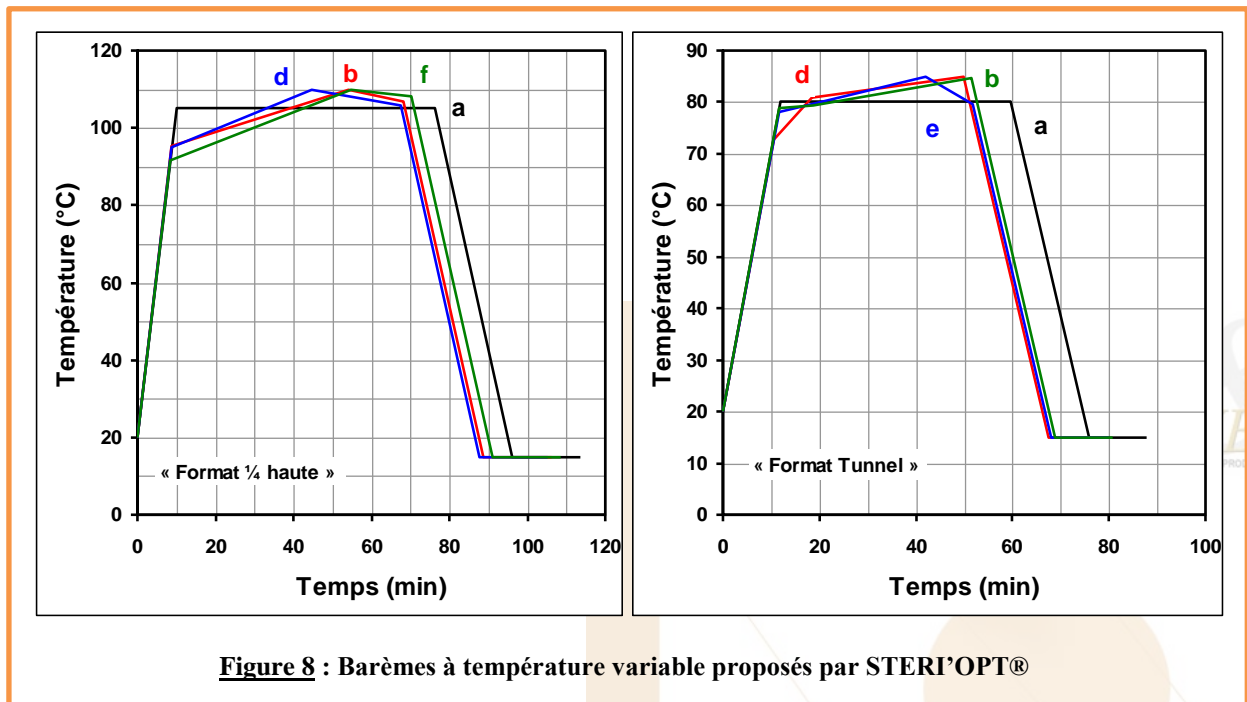
(f) minimisation VC moyenne pondéré à 100% et contrainte imposée VC surface  $\leq$  VC surface déterminée à température constante.

**Tableau 7 : Barèmes à température variable proposés par STERI'OPT®**

Stérilisation « Format ¼ haute »										
Phase	(b)			(d)			(f)			
	T début (°C)	T fin (°C)	Durée (min)	T début (°C)	T fin (°C)	Durée (min)	T début (°C)	T fin (°C)	Durée (min)	
CUT	20,00	95,21	8,85	20,00	94,98	8,82	20,00	91,69	8,43	
Phase 1	95,21	110,00	45,14	94,98	109,78	35,74	91,69	109,80	46,45	
Phase 2	110	106,88	14,40	109,78	105,71	23,07	109,8	108,06	15,38	
CDT	106,88	15,00	20,42	105,71	15,00	20,16	108,06	15,00	20,68	
Palier froid	15,00	15,00	17,48	15,00	15,00	17,43	15,00	15,00	17,52	
Temps total (min)			106,29				105,22			
Pasteurisation « Format Tunnel »										
Phase	(b)			(d)			(e)			
	T début (°C)	T fin (°C)	Durée (min)	T début (°C)	T fin (°C)	Durée (min)	T début (°C)	T fin (°C)	Durée (min)	
CUT	20,00	78,87	11,77	20,00	72,65	10,53	20,00	77,98	11,60	
Phase 1	78,87	79,37	6,89	72,65	80,82	7,96	77,98	85,00	30,50	
Phase 2	79,37	84,73	32,71	80,82	84,90	31,49	85,00	79,73	9,77	
CDT	84,73	15,00	17,43	84,90	15,00	17,48	79,73	15,00	16,18	
Palier froid	15,00	15,00	12,08	15,00	15,00	12,08	15,00	15,00	12,00	
Temps total (min)			80,88				79,54			

Egalement, toutes les configurations d'optimisation (b, c, d, e, f) ont été conditionnées par une contrainte imposée sur la durée totale du cycle qui doit rester inférieure à la durée totale du cycle calculé à température constante. Le barème à température constante a été représenté par la lettre (a).

Les barèmes à température variable (Tableau 7, Figure 8) ont été calculés avec les mêmes pentes de CUT et CDT que les barèmes à température constante, afin de permettre les comparaisons. La température *maximale*  $T_b$  admissible du traitement thermique à température variable, 110°C pour la stérilisation et 85°C pour la pasteurisation, a été fixée en accord avec la Figure 7.



**Figure 8 : Barèmes à température variable proposés par STERI'OPT®**

Le **Tableau 8** montre les améliorations (diminution constatées, en pourcentage de la valeur initiale) obtenues par les traitements à température variable par rapport aux barèmes de référence à température constante. Seules les améliorations correspondant aux trois meilleurs barèmes à température variable sont présentées.

Pour la stérilisation du foie gras en boîte 1/4, le barème type **d** présente le meilleur compromis d'optimisation avec une réduction de la Valeur Cuisatrice en surface, et en moyenne dans tout le volume, de 8 % et 9 % environ, respectivement, à Valeur Stérilisatrice à cœur constante : 0,6 minute. Cela accompagné d'une

réduction du temps de cycle total de 7 % : Comparé au barème à température constante, ce traitement améliore à la fois productivité industrielle et potentiellement la qualité du produit.

Pour le foie gras pasteurisé en boîte tunnel, les valeurs cuisatrices restent globalement faibles, car les températures sont assez basses, largement en dessous de 90°C. Toutefois, une amélioration est obtenue, en particulier avec le cycle **d**, qui permet de réduire la durée du cycle de plus de 9%, tout en réduisant l'impact de cuisson de plus de 6% en moyenne, et de 12 % à cœur.

**Tableau 8 : Améliorations obtenues par les traitements à température variable**

Format	Barèmes	Valeurs cuisatrices			Temps Total (%)
		Cœur (%)	Surface (%)	Moyenne (%)	
1/4 haute	(b)	-13,15	-9,10	-9,82	-6,28
	(d)	-12,79	-8,10	-9,09	-7,24
	(f)	-12,91	-10,49	-10,42	-4,40
Tunnel	(b)	-10,54	-2,16	-5,94	-7,79
	(d)	-12,47	-2,01	-6,64	-9,34
	(e)	-11,61	-2,59	-6,47	-8,75

## Conclusions

Les barèmes de stérilisation et de pasteurisation à température variable proposés par STERI'OPT® sont applicables à l'échelle industrielle. Ils permettent de réduire la valeur cuisatrice (2 à 13%) afin d'améliorer les qualités organoleptiques du produit (couleur, texture, saveur, fonte...), et/ou d'améliorer l'homogénéité de cuisson dans l'ensemble du volume. Egalement, la durée totale des traitements thermiques peut être réduite (de 4 à 9%), permettant ainsi une possible augmentation de la productivité.

*Remarque : Les traitements thermiques présentés dans cet article sont des exemples développés seulement pour la validation du logiciel STERI'OPT® et la démonstration des performances du logiciel, et ne doivent pas être utilisées pour une production industrielle.*

## Références bibliographiques

- Almonacid-Merino, S.F., Simpson, R. and Torres, J.A. (1993)**, Time Variable Retort Temperature Profiles for Cylindrical Cans, Batch Process Time, Energy Consumption, and Quality Retention Model. *J. Food Process Eng.*, **16**, 271-287.
- Banga, J.R., Perez-Martin, R.I., Gallardo, J.M and Casares, J.J. (1991)**, Optimisation of the Thermal Processing on Conduction Heated Foods: Study of Several Objective Functions. *J. Food Eng.*, **14**, 25-51.
- Basset V., Le Ba D., Seince J.L., Zuber F., 1997**. Information technique du CTCPA N°134 'Valeurs pasteurisatrices et traitements thermiques des foies gras pasteurisés'.
- Box, M.J. 1965**, A New Method of Constrained Optimization and comparison with other methods, *Computer J.*, **8**, 42-52.
- Chen, C. R., Ramaswamy, H.S. (2002)**, Modeling and Optimization of Variable Retort Temperature (VRT) Thermal Processing using Coupled Neural Networks and Genetic Algorithms, *J. Food Eng.*, **53** (2002), 209-220.
- Dou, I., Toma, S. and Nakai, S. (1993)**, Random-centroid Optimization For Food Formulation, *Food Res. Int.*, **26**, 27-37.
- Durance, T. (1997)**, Improving Canned Food Quality with Variable Retort Temperature Processes. *Trends Food Sci. Technol.*, **8**, 113-118.
- Durance, T.D., Dou, J. and Mazza, J. (1996)**, Selection of Variable Retort Temperature Processes for Canned Salmon, *J. Food Process Eng.*, **20**, 65-76.
- Duquenoy, A., 1991**. La Conserve Appertisée : aspects scientifiques, techniques et économiques. Larousse J. (ed). Tec. & Doc Lavoisier, Paris, pp. 207-231.
- Erdoğan, F., Balaban, M. (2003a)**, Complex Method For Nonlinear Constrained Multi-criteria (multi-objective function) Optimization of Thermal Processing, *J. Food Process Eng.*, **26** (2003), 357-375.
- Erdoğan, F., Balaban, M. (2003b)**, Nonlinear Constrained Optimization of Thermal Processing. II. Variable Processes Temperature Profiles to reduce Process Time and to improve Nutrient Retention in Spherical and Finite Cylindrical Geometries.
- Lihan Huang (2007a)** Computer Simulation of heat transfer during in-package pasteurization of beef frankfurters by hot water immersion, *J. Food Eng.*, **80**, 839-849.
- Lihan Huang (2007b)** Determination of effective heat transfer coefficients for can headspace during thermal sterilization process, *J. Food Eng.*, **79** 1166-1171.
- Magee, T.R.A., (1995)**. Measurement of thermal diffusivity of Potato, Malt Bread and Wheat Flour, *J. Food Eng.*, **25**, 223-232.
- Noronha J., Vann Loey A, Hendrickx M, Tobback P. (1996)**, An empirical equation for the description of optimum variable retort temperature profiles that maximize surface quality retention in thermally processed foods. *J. Food Process Preserv.*, **20**, 251-264.
- Noronha, J., Hendrickx, M., Suys, J. and Tobback, P. (1993)**, Optimization of Surface Quality Retention during the Thermal Processing of Conduction Heated Foods using Variable Temperature Retort Profiles, *J. Food Process. Preserv.* **17** (1993), 75-91.
- Ohlsson, T. 1979**, Temperature dependence of sensory quality changes during thermal processing.
- Pontryagin, L.S., Boltyanskii, V.G., Gamkrelidze, R.V. and Mishchenko. (1962)**, *The Mathematics of Optimal Process*, Wiley Interscience.
- Saguy, I. and Karel, M. (1979)**, Optimal Retort Temperature Profile in Optimizing Thiamin Retention in Conduction-type Heating of Canned Foods. *J. Food Sci.*, **44**, 1485-1490.
- Sobczak E., Cordier G., 2004**. Information Technique du CTCPA N° 218 'Étude du mode de quantification de la valeur cuisatrice pour le pilotage de la qualité organoleptique du bloc de foie gras appertisé'. (12) Ball O., Olson W., 1957. Sterilization in food technology. Mc Graw-Hill Book Co., New York.
- Teixeira, A.A., Dixon, I.R., Zahradnik, J.W. and Zinsmeister, G.E. (1969)**, Computer Optimization of Nutrient retention in Thermal Processing of Conduction-heated Foods, *J. Food Technol.*, **23**, 845-850.
- Teixeira, A.A., Zinsmeister, G.E. and Zahradnik, J.W. (1975)** 'Computer Simulation of Variable Retort Control and Container Geometry as a Possible Means of Improving Thiamine Retention in Thermally Processed Foods. *J. Food Sci.*, **40**, 656-659.

**Zuber, F., Biton, M, and Cazier A., 2008.** Bases Scientifiques pour la maîtrise des produits appertisés. Techniques de l'Ingénieur, F 2 031.

**Zuber, F., Biton, M, and Cazier A., 2008.** Conception et validation des barèmes d'appertisation. Techniques de l'Ingénieur, F 2 032.

