



Fiche outil d'aide à la rédaction d'un guide de bonnes pratiques d'hygiène (GBPH)

TECHNIQUES

Éléments pour évaluer l'efficacité d'un traitement thermique sur la contamination microbologique des aliments

Avertissements : la fiche ne traite que des effets du traitement thermique sur les micro-organismes et ne traite pas des modalités de transfert et de pénétration de la chaleur dans les aliments. Toutes les valeurs chiffrées de thermorésistance des microorganismes, présentées dans cette fiche, ne sont que des exemples à titre d'illustration, et ne doivent pas être utilisées sans recul pour l'établissement de procédés.

Introduction

Le traitement des aliments par la chaleur (ou traitement thermique) est une des plus importantes techniques destinées à prolonger la conservation des aliments. Il a pour objectif de détruire ou d'inhiber totalement ou partiellement les enzymes et les microorganismes dont la présence ou la prolifération pourrait altérer les aliments ou les rendre impropres à l'alimentation humaine.

La méthode HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point) ou Système analyse des dangers - points critiques pour leur maîtrise, a été adoptée par le *Codex Alimentarius* en 1993 et annexée en 1997 au Code d'usages international recommandé - Principes généraux d'hygiène alimentaire (CAC/RCP 1-1969). C'est la méthode de référence préconisée par les règlements fondateurs du « paquet hygiène » de l'Union européenne, et ses principes sont d'application **obligatoire** pour les exploitants du secteur alimentaire hors production primaire.

Son premier principe, l'analyse des dangers, consiste, pour les exploitants, à identifier et à hiérarchiser les dangers liés à leur production afin de déterminer ceux qui sont significatifs et qu'il est, de ce fait, essentiel de maîtriser, puis à sélectionner les mesures de maîtrise disponibles¹.

Pour mener à bien ce travail, les exploitants ont à mettre en place une suite structurée d'activités de recherche et d'analyses d'informations pertinentes, essentiellement bibliographiques et/ou prenant en compte l'historique de l'entreprise pour identifier les causes d'apparition ou d'augmentation de la quantité de dangers biologiques liées aux matières premières, ingrédients et conditions de préparation (locaux, matériels, personnel, environnement de production). Ils doivent également étudier le ou les procédés de fabrication mis en œuvre afin d'en déduire si les techniques utilisées peuvent ou non être également à l'origine d'apparition ou d'augmentation de la quantité

de dangers ou de persistance de dangers bactériens suite à un traitement thermique insuffisant par exemple.

L'effet d'un traitement thermique est lié au couple temps/température. Plus la température de traitement est élevée, et plus sa durée est longue, plus l'effet sera important. Il faut toutefois tenir compte de la résistance thermique des micro-organismes qui est très variable, et fonction des caractéristiques physico-chimiques de l'aliment concerné.

On distingue plusieurs types de traitement thermique des aliments : l'**appertisation**², la **pasteurisation**, la **thermisation**³, la cuisson, le blanchiment.

Pour sélectionner les mesures de maîtrise des dangers significatifs, il est important d'être en mesure d'évaluer l'efficacité d'un traitement thermique en termes de nombre de réductions décimales (divisions par dix) de la charge en micro-organismes.

Il incombe aux industriels de **valider** leurs traitements thermiques préalablement à leur mise en œuvre, notamment (i) pour les conserves appertisées⁴, et (ii) pour la qualité sanitaire des produits pasteurisés et réfrigérés, et leur durée de vie microbologique⁵.

A- Définitions relatives aux traitements thermiques : généralités

1) Cinétique et paramètres de destruction

La diminution en fonction du temps d'une population de micro-organismes soumise à un traitement thermique létal (figure 1) suit le plus souvent une décroissance exponentielle : lorsque l'on utilisera des coordonnées semi-logarithmiques il s'agira donc d'une droite (figure 2).

¹ voir fiche outil « l'analyse des dangers présente dans les GBPH, à quoi ça sert, comment la réalise-t-on ? » Anses 2014 :

<https://www.anses.fr/fr/system/files/GBPH2013sao169.pdf>

² Dans ce document, les termes stérilisation et appertisation sont considérés comme équivalents

³ Informations complémentaires dans la spécification technique de l'achat public laits et produits laitiers Groupe d'étude des Marchés de restauration collective et nutrition (GEM RCN) Juillet 2009, Direction des affaires juridiques Ministère de l'économie, de

l'industrie et de l'emploi

⁴ Instruction Technique DGAL/SDSSA/2015-364 du 06 octobre 2015, relative aux conditions hygiéniques et sanitaires de production et de mise sur le marché de produits végétaux ou animaux appertisés (produits à base de viande et produits de la pêche) et aux modalités de contrôle officiel de ces établissements

⁵ Note de service DGAL/SDSSA/N2010-8062 du 9 mars 2010 : Durée de vie microbologique des aliments

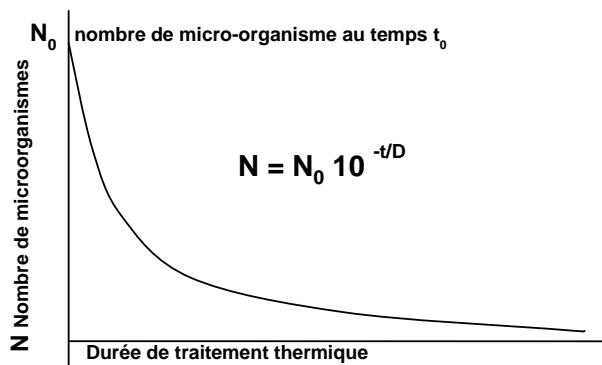


Figure 1 : courbe de survie en fonction du temps de traitement thermique d'une population de microorganismes, dans un milieu donné et pour une température donnée

Lors de l'application d'un traitement thermique à une température donnée T constante, au cours du temps, et en utilisant une représentation de la courbe : $\log_{10}(\text{population survivante})$ en fonction du temps de traitement à température constante, il est possible de calculer le **temps de réduction décimale**, noté D_T (figure 2a) :

$$D_T = t / (\log_{10}N_0 - \log_{10}N) \quad (\text{équation 1})$$

D_T est le temps de traitement thermique, exprimé généralement en minutes, nécessaire à la température T pour diviser par dix la charge microbienne.

Exemple : si la concentration de micro-organismes présents dans la denrée est de $10^2/\text{g}$ ($= N_0$) à l'instant t_0 , D_T est le temps nécessaire pour obtenir à la température T une concentration microbienne $10^2/10 = 10$ micro-organismes/g.

Lorsque la température de traitement augmente, la vitesse de destruction des micro-organismes est plus rapide ; D_T est donc plus faible : pour $T_2 > T_1$ alors $D_{T_2} < D_{T_1}$ (figure 2b).

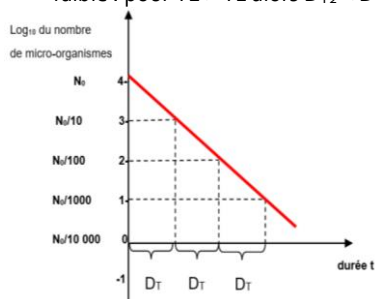


Figure 2a : Droite de survie aux traitements thermiques en échelle semi-logarithmique pour une température donnée T (avec l'aimable autorisation d'A. Gonthier)

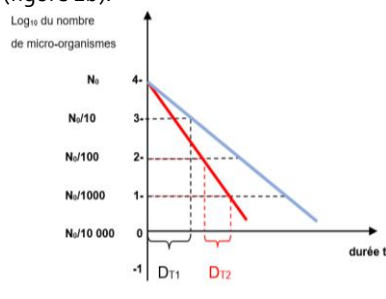


Figure 2b : Droite de survie aux traitements thermiques en échelle semi-logarithmique lorsque la température augmente à $T_2 > T_1$

Influence de la température sur les cinétiques de destruction

- En reportant $\log(D_T) = f(\text{température } T)$ (figure 3), la courbe obtenue est une droite. Le symbole z est utilisé pour exprimer l'écart de température en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$) pour lequel les D_T sont dans un rapport de 1 à 10. Pour la plupart des moisissures et des spores de moisissures, les bactéries et les spores de bactéries, z varie de 6 à 14°C , avec de nombreux cas où z est voisin de 10°C . Les formes sporulées ont, **en général**, un z compris entre 7 et 14°C et les formes végétatives un z compris entre 4 et 7°C . Le milieu dans lequel les micro-organismes sont étudiés peut le modifier.

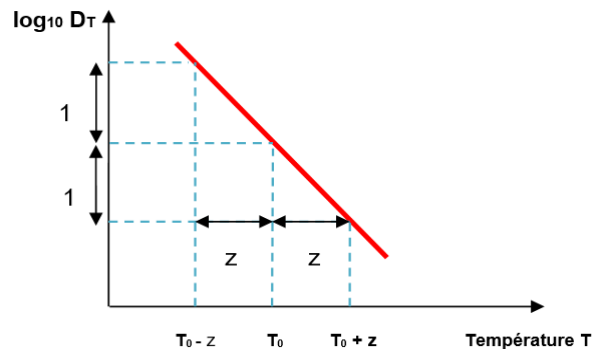


Figure 3 : temps de réduction décimale en fonction de la température en échelle semi-logarithmique (avec l'aimable autorisation d'A. Gonthier)

Dans la pratique, cela signifie que lorsque la température est augmentée de $z^{\circ}\text{C}$, le temps nécessaire pour obtenir le même résultat en termes de destruction bactérienne est divisé par 10. Lorsque la température est réduite de $z^{\circ}\text{C}$, le temps nécessaire pour obtenir le même résultat en termes de destruction bactérienne est multiplié par 10.

2) Relation entre deux valeurs de D à des températures différentes

Si l'on connaît le z et une valeur D_{T_0} , à la température T_0 , il est possible de calculer pour chaque température létale la valeur D_T correspondante :

$$D_T = D_{T_{\text{réf}}} \times 10^{(T_0 - T)/z} \quad (\text{équation 2})$$

Exemple pour *Clostridium botulinum* type A :

$$D_{121} = 0,21 \text{ min et } z = 10^{\circ}\text{C}$$

$$D_{111} = 2,1 \text{ min}$$

$$D_{131} = 0,021 \text{ min}$$

$$D_{115} = D_{121} \times 10^{(121-115)/10} = 0,21 \times 10^{(6/10)} = 0,21 \times 3,98 = 0,84 \text{ min} = 50 \text{ s}$$

Il est important de noter que :

- les équations 1 et 2 sont indépendantes du nombre initial de microorganismes ;
- la courbe de survie peut être prolongée aux logarithmes négatifs : par exemple $\log_{10}(10^{-2} \text{ ufc/g}) = -2$ correspond à 1 micro-organisme survivant dans 100 g, $\log_{10}(10^{-3} \text{ ufc/g}) = -3$ correspond à 1 survivant dans 1000 g, etc.

De ce fait, la population bactérienne tend vers zéro, sans jamais l'atteindre.

Imaginons 1000 boîtes de conserve contenant chacune une spore thermorésistante avant traitement : le lot comporte 1000 spores. Après un traitement assurant 3 réductions décimales, il reste seulement une spore survivante, qui se trouve dans l'une des boîtes. Après traitement, on a donc une boîte non stérile (elle contient encore une spore), et 999 boîtes stériles (elles ne contiennent pas de spore survivante). Lorsqu'on considère une boîte isolément, elle est stérile ou pas. Lorsqu'on considère un lot, il contient une proportion de boîtes non stériles. Dans l'exemple ci-dessus, la proportion est 10^{-3} . Si on avait poursuivi le traitement pour obtenir une réduction décimale de plus, elle serait passée à 10^{-4} : il y aurait encore une boîte non stérile, mais dans dix lots de 1000 boîtes.

- la « stérilité commerciale » se rapporte à la stabilité microbiologique des produits conservés à température ambiante, c'est-à-dire, pour les conserves d'aliments peu acides conditionnés, selon la définition du *Codex Alimentarius* (CAC/RCP 40-1993)⁶, à « l'absence de microorganismes susceptibles

⁶Code d'usages en matière d'hygiène pour les conserves d'aliments peu acides conditionnés aseptiquement CAC/RCP 40 - 199

de se développer dans l'aliment dans les conditions non réfrigérées normalement prévues pour la fabrication, la distribution et l'entreposage».

- la courbe de survie $\log N = f(t)$ telle que mesurée expérimentalement à température constante dévie souvent de la linéarité. Elle présente dans certains cas (notamment pour les spores bactériennes) une forme en S inversé avec une "épaule" et une "traînée" (voir figure 4).

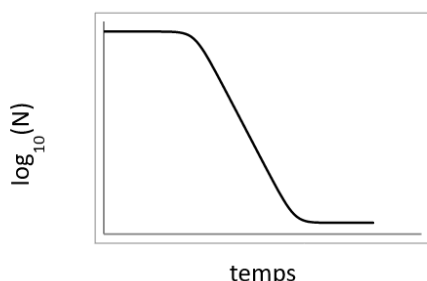


Figure 4 : exemple de courbe $\log N = f(t)$ déviant de la linéarité

En pratique, ces épaules ou ces traînées prolongent la durée pour obtenir un nombre de réductions décimales donné. Un épaulement initial peut avoir pour origine un temps nécessaire pour l'« activation » des spores causée par un traitement thermique bref et non létal, ou par le fait que les micro-organismes forment des amas. Une traînée peut être causée, par exemple, par la formation d'amas cellulaires pendant le traitement, ou par l'existence d'une sous population plus résistante. Des outils informatiques intégrant ces phénomènes sont accessibles (voir quelques exemples dans les liens utiles).

- la pénétration de la chaleur dans l'aliment en cours de traitement thermique dépend de nombreux facteurs et peut varier selon que le milieu est liquide ou solide, le type de contenant (verre, boîte en métal, etc.), le taux de matières grasses dans la denrée, la présence de morceaux, etc.

NB : l'objectif de ce document est de fournir des outils pratiques d'évaluation. Pour des situations complexes ou pour l'approfondissement, le lecteur devra se reporter à des éléments de génie des procédés (certains sont cités en référence).

- les valeurs de DT et z sont fortement dépendantes des caractéristiques du milieu, donc du produit (pH, a_w ,...). Les données bibliographiques ne peuvent être utilisées sans recul et

sans une analyse préalable de la situation concrète. Leur détermination est souvent réalisée sur milieux synthétiques en laboratoire correspondant à des conditions favorables (température, pH, a_w) différentes de celles existant dans les matrices alimentaires. Des méta-analyses (Rigaux et al. 2013 ; Diao et al. 2014) mettent en évidence la diversité de la thermorésistance intrinsèque des souches bactériennes, ainsi que leur dépendance des paramètres physico-chimiques de la matrice alimentaire. Pour des raisons pratiques, des valeurs moyennes sont souvent retenues. Toutefois, il existe des techniques de calcul qui permettent de prendre en compte cette diversité et cette variabilité.

Pour illustrer la diversité inter-espèces de la thermorésistance des spores, voici des valeurs de la température où l'ordre de grandeur de D est 10 min : 60°C pour *Clostridium botulinum* type E, 100°C pour *Clostridium sporogenes*, 125°C pour *Geobacillus stearothermophilus*. Le tableau 1 illustre la variabilité de la thermorésistance au sein d'une même espèce.

B- Définitions relatives aux différents types de traitements thermiques

Il est important de noter en préambule que l'efficacité d'un traitement thermique en termes d'inactivation des micro-organismes est conditionnée par les facteurs suivants :

- la nature et les caractéristiques des micro-organismes présents dans le produit et leur capacité de résistance au traitement thermique (paramètre qualitatif)
- le nombre de micro-organismes présents avant le traitement thermique (paramètre quantitatif) lui-même conditionné par la qualité des matières premières (d'où l'importance des bonnes pratiques d'hygiène et de fabrication en amont)
- les caractéristiques physico-chimiques de l'aliment et/ou la présence dans l'aliment d'inhibiteurs de la croissance microbienne (agents conservateurs) pouvant avoir un impact sur la survie et puis la croissance des micro-organismes après le traitement (pH, a_w).

Par exemple, on constate une augmentation de la thermorésistance, donc du nombre de micro-organismes survivants, dans les produits à faible a_w (produits déshydratés, riches en sel ou en sucre) ou riche en matières grasses, et une diminution de la thermorésistance lorsque l'on s'écarte des pH compris entre 6,0-8,0.

Tableau 1 : valeur moyenne de $\log_{10}(D)$, et leurs intervalles de confiance à 95%, à température de référence Tréf pour 3 espèces bactériennes capables de sporuler, et pour 2 espèces bactériennes végétatives d'après den Besten et al. 2018

Micro-organisme	Nbre de souches	T _{ref} (°C)	Log ₁₀ D _{ref} [lc 95%] (log ₁₀ min)	Ecart Type	z(°C)	Référence
<i>Lb. subtilis</i> ^a	11	120	0,021 [-0,75 ; 0,79]	0,39	10,1	den Besten et al. 2017
<i>Lb. subtilis</i> ^b	9	120	-2,1 [-2,6 ; -1,6]	0,24	7,7	den Besten et al. 2017
<i>Lb. subtilis</i> ^c	20	120	-0,16 [-1,4 ; 1,1]	0,62	51,6	den Besten et al. 2017
<i>G. stearothermophilus</i>	18	120	0,47 [0,13 ; 0,81]	0,17	11,1	Wells-Bennik et al. 2018
<i>B. cereus</i>	21	120	-1,7 [-2,4 ; -1,1]	0,31	11,4	Voir suppléments en ligne (tableau 1) de den Besten et al. 2018
<i>L. monocytogenes</i>	20	70	-1,7 [-2,2 ; -1,3]	0,23	5,2	Aryani et al. 2015
<i>Lb. plantarum</i>	20	70	-2,3 [-2,9 ; -1,7]	0,30	5,1	Aryani et al. 2016

^a Paramètres de thermorésistance de souches produisant des spores à haut degré de résistance à la chaleur - ^b Paramètres de thermorésistance de souches produisant des spores à faible degré de résistance à la chaleur - ^c paramètres de thermorésistance basés sur toutes les souches de *Lb. subtilis*

1) Définitions relatives aux traitements thermiques appliqués

Selon l'instruction technique conjointe DGAL/SDSSA/ n° 2015-364 : « Sont considérées comme « conserves », au sens du présent décret, les denrées alimentaires d'origine végétale ou animale, périssables, dont la conservation est assurée par l'emploi combiné des deux techniques suivantes :

1° Conditionnement dans un récipient étanche aux liquides, aux gaz et aux micro-organismes, à toute température inférieure à 55°C ;

Remarque : considérant la date de signature du décret et les évolutions technologiques intervenues depuis 1955, les conditionnements hermétiquement scellés, étanches aux liquides et aux micro-organismes, mais ne présentant qu'une étanchéité partielle aux gaz, sont également employés, tels les récipients semi-rigides ou souples.

2° Traitement par la chaleur, ou par tout autre mode autorisé par arrêté pris de concert entre les ministres [...]. Ce traitement doit avoir pour but de détruire ou d'inhiber totalement, d'une part, les enzymes, d'autre part, les micro-organismes et leurs toxines dont la présence ou la prolifération pourrait altérer la denrée considérée ou la rendre impropre à l'alimentation humaine. »

Le mode de fabrication des conserves ou produits appertisés doit permettre d'assurer leur stabilité biologique dans des conditions normales d'entreposage à température ambiante.

- **Stérilisation :** traitement thermique à des températures supérieures à 100°C, visant à détruire les enzymes, les micro-organismes dans leurs formes végétatives et sporulées et leurs toxines thermosensibles assurant la stabilité à température ambiante des produits. Ce traitement doit être appliqué aux denrées dont le pH est supérieur ou égal à 4,5

- **Pasteurisation :** traitement thermique à des températures pouvant être inférieures à 100°C visant à détruire les enzymes et les micro-organismes dans leur forme végétative »

Ainsi, les conserves ou produits appertisés subissent un traitement de stérilisation. Pour les produits acides ou acidifiés⁷, la stabilité peut également être assurée par un traitement de pasteurisation associé à un pH inférieur à 4,5

À noter : l'application d'un traitement thermique de pasteurisation (température inférieure ou égale à 100°C) à une denrée alimentaire dont le pH est supérieur ou égal à 4,5⁸ doit être associée à une RÉFRIGÉRATION du produit fini et à la détermination d'une date limite de consommation (DLC). Il ne s'agit pas d'un produit appertisé mais d'une denrée microbiologiquement très périssable non traitée dans le cadre de cette note de service ».

2) Définitions des valeurs pasteurisatrices et stérilisatrices

Pour les produits traités thermiquement, la température au point critique ou « point froid » (c'est-à-dire la zone devant recevoir au moins l'intensité de traitement requise, le plus souvent à cœur du produit) peut être suivie. Son historique thermique (profil temps – température) peut être exprimé sous la forme d'une grandeur cumulative appelée Valeur Stérilisatrice (VS, ou F dans les publications nord-américaines) ou Pasteurisatrice (VP) exprimée en minutes, qui caractérise l'intensité du traitement thermique appliqué au produit alimentaire considéré et qui se calcule comme suit :

$$VS \text{ ou } VP = \int_0^t 10^{(T-T_{ref})/z} \cdot dt$$

Où : t : durée du traitement thermique (en minutes)

T : température du produit au cours de ce traitement thermique (en °C),

T_{réf} : température de référence du calcul (en °C), soit usuellement :

- 121,1°C (250°F) pour la stérilisation des conserves de produits non acides,

- 93,3°C (200°F) pour la pasteurisation des conserves de produits acides,

- 70°C pour la pasteurisation de produits non acides, réfrigérés et auxquels une date limite de consommation (DLC) est appliquée.

- z: facteur défini plus haut.

En cas de manque de données sur la situation actuelle, les valeurs prises par défaut pour les produits dont l'activité de l'eau (a_w) est élevée sont usuellement 10°C pour la stérilisation ou 8,89°C (48°F) pour la pasteurisation de produits acides stables à température ambiante, ou encore 10°C pour la pasteurisation des produits non acides réfrigérés soumis à DLC.

Quand la température de traitement thermique est constante, l'équation ci-dessus devient :

$$VS \text{ ou } VP = t \cdot 10^{(T-T_{ref})/z}$$

3) Calcul des barèmes de pasteurisation et de stérilisation

La démarche comporte trois temps :

1. la détermination du nombre de réductions décimales des micro-organismes d'intérêt, tel que l'aliment soit commercialement stérile,

2. la détermination du temps nécessaire pour atteindre ce nombre à une température de référence appropriée,

3. la vérification que la VS ou la VP du traitement thermique que l'on applique ou que l'on appliquera est égale ou supérieure à ce temps.

Pour connaître les caractéristiques de thermorésistance qui serviront à calculer la combinaison temps/température assurant le nombre de réductions décimales à obtenir, on expérimente soit avec le micro-organisme d'intérêt (celui qui contamine le produit considéré), soit avec un "microorganisme test" :

Stérilisation des produits non acides

Rappel : température de référence = 121,1°C. Le barème de stérilisation doit permettre à minima la destruction des spores de *Clostridium botulinum* de type A (un des types les plus couramment rencontrés en France du danger bactérien le plus thermorésistant), et l'obtention de la stabilité (stérilité commerciale).

Pasteurisation des produits acides ou acidifiés

Rappel : température de référence = 93,3°C. En l'absence de micro-organisme pathogène de référence thermorésistant et acidotolérant, le micro-organisme de référence souvent retenu est l'ascospore de *Paecilomyces fulvus* (moisissure acidotolérante et thermorésistante), avec z = 8,89°C. La valeur de D dépend fortement du pH et du milieu.

Pasteurisation (produits non acides)

Rappel : température de référence = 70°C. *Enterococcus faecalis*, forme végétative parmi les plus thermorésistantes est souvent prise pour référence ((D₇₀ = 2,95 min et z = 10°C).

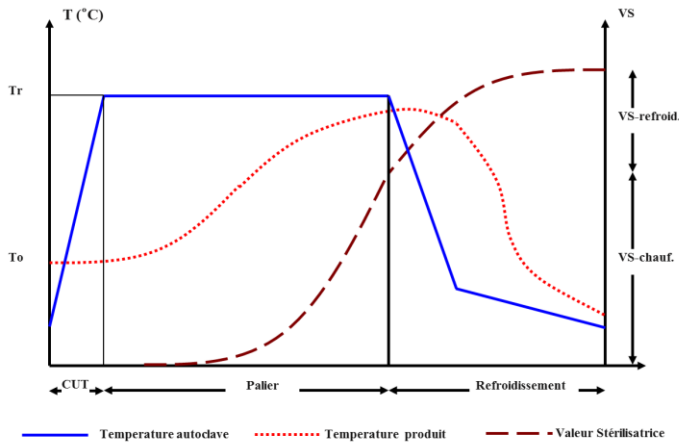
Le choix du nombre de réductions décimales à obtenir lors d'une pasteurisation dépend de facteurs difficiles à évaluer et à chiffrer (contamination initiale, micro-organismes cibles, caractéristiques physico-chimiques de l'aliment, DLC attendue...). A l'étranger, certaines agences de sécurité sanitaire des aliments recommandent de viser l'obtention de 5 à 7 réductions décimales.

⁷ Exemples : cornichons et autres produits pasteurisés et conservés dans le vinaigre ; produits naturellement acides tels que fruits, tomates, ratatouilles, etc.

⁸ Cette limite de pH 4,5 est justifiée par la nécessaire maîtrise du danger *Clostridium botulinum* dont la limite inférieure de germination et de croissance est pH 4,6 (Anses 2011).

Calculs des valeurs pasteurisatrices et stérilisatrices

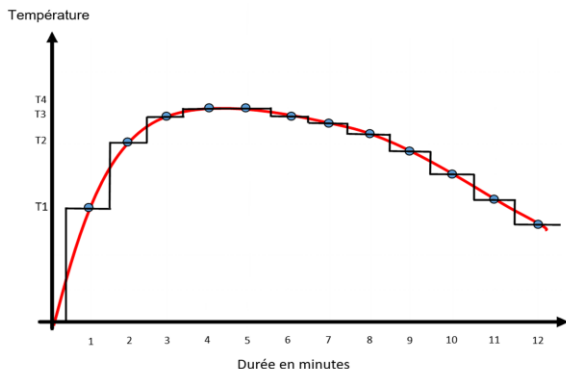
La montée en température de la plupart des produits alimentaires, des plats cuisinés notamment, s'opère principalement par conduction thermique. La température à l'intérieur du produit varie ainsi durant toute la durée du traitement thermique (figure 5).



CUT = come up time = durée de la phase de montée en température de l'autoclave

Figure 5 : Profil type de traitement thermique – Variations de températures dans l'enceinte, à cœur du produit, et valeur stérilisatrice cumulée au point critique du produit

La VS ou la VP du traitement total est la somme des VS ou VP des couples temps/températures appliqués successivement au produit. Le traitement thermique global à des températures variables est décomposé en une succession de traitements thermiques élémentaires, de même durée (en général de l'ordre de la minute, voir figure 6). La température de chaque traitement thermique élémentaire est supposée constante.



n° de la minute	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Température Ti	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
Ti-70	a	b	c	c	e						
10 ^{(Ti-70)/10}	x	y	z								

$$VP = \sum_{i=1}^{i=12} VP_i = \sum_{i=1}^{i=12} 1 \cdot 10^{(T_i - 70) / 10}$$

$$VP = x + y + z + \dots$$

Figure 6 : calcul par la méthode de Bigelow

4) Exemples de VS et VP de référence

Conserves appertisées : la valeur stérilisatrice choisie depuis 1921 aux États-Unis, correspond à 12 réductions décimales des spores de *Clostridium botulinum* 62A. Par conséquent, VS = Fo = 12x0,21 = 2,52 min arrondi à 3 min.

Pour mémoire, l'appertisation vise également à assurer la destruction de bactéries sporulées non pathogènes susceptibles d'entraîner des altérations et dont la thermorésistance est supérieure à celle de *Clostridium botulinum*. Des VS supérieures à Fo = 3 min peuvent donc être nécessaires (en cas de contamination par des spores de *Geobacillus stearothermophilus*, *Bacillus sporothermodurans*, *Moorella thermoacetica* par exemple).

Plats cuisinés et les produits de charcuterie : il est souvent considéré en France que pour répondre à l'objectif de la pasteurisation, il faut 13 réductions décimales de *Enterococcus faecalis* à 70°C. Par conséquent, VP = 13x2,95 = 38,35 arrondi à 40 min.

Cas particulier du lait : selon le Code d'usages en matière d'hygiène pour le lait et les produits laitiers du Codex Alimentarius, « les conditions minimales de pasteurisation doivent avoir un pouvoir bactéricide équivalent au réchauffement de chaque particule du lait jusqu'à la température de 72°C pendant 15 secondes (pasteurisation continue) ou jusqu'à 63°C pendant 30 minutes (pasteurisation par lot) ».

Cas particulier du foie gras : une étude conduite en 2011, dans un cadre maîtrisé de production, a montré que le foie gras, malgré un pH supérieur à 4,5, peut être stabilisé en appliquant une VS minimale de 0,6 min, et ce avec la mise en place d'actions de maîtrise des dangers à toutes les étapes de la chaîne de fabrication du produit (André et al. 2013a).

Références

Réglementation française et documents à valeur réglementaire.

- Décret n°55-241 du 10 février 1955 pris pour l'application en ce qui concerne le commerce des conserves et semi-conserves alimentaires de la loi du 1er août 1905 modifiée et complétée sur la répression des fraudes. Version consolidée au 9 juillet 2018.
- Arrêté du 26 septembre 1985 relatif au contrôle de la stabilité des conserves végétales. Version consolidée au 9 juillet 2018.
- Note de service DGAL/SDSSA/N2012-8156 du 24 juillet 2012 : Inspection des procédures fondées sur les principes HACCP dans le cadre du contrôle officiel du plan de maîtrise sanitaire d'un établissement du secteur alimentaire, hors production primaire. pp. 43.
- Note de service DGAL/SDSSA/N2010-8062 du 09 mars 2010 : Durée de vie microbologique des aliments. pp. 16.
- Note de service DGAL/SDSSA/N2011-8153 du 28 juin 2011. Production de produits à base de viande dans les établissements agréés ou dérogatoires à l'agrément. pp. 21.
- Instruction Technique DGAL/SDSSA/2015-364 du 06 octobre 2015, relative aux conditions hygiéniques et sanitaires de production et de mise sur le marché de produits végétaux ou animaux appertisés (produits à base de viande et produits de la pêche) et aux modalités de contrôle officiel de ces établissements. pp. 16.

Références internationales et guides de bonnes pratiques

- Code d'usages en matière d'hygiène pour les conserves non acidifiées ou acidifiées de produits alimentaires naturellement peu acides (CAC/RCP 23-1979) adopté en 1979. Révisions en 1989 et 1993. Corrections éditoriales en 2011.

- Codes d'usages international recommandé- Principes généraux 'hygiène alimentaire (CAC/RCP 1-1969, Rev.4-2003) - *Codex Alimentarius*.
- Communication de la commission relative à la mise en œuvre d'un plan de maîtrise sanitaire du secteur alimentaire applicable aux programmes prérequis (PRP) et aux procédures fondées sur les principes HACCP, y compris la flexibilité accordée à certaines entreprises. Journal Officiel de l'Union Européenne C278/1, 30.7.2016.
- Guidance document on the implementation of procedures based on the HACCP principles, and on the facilitation of the implementation of the HACCP principles in certain food businesses SANCO/1955/2005 Rev.3
- Guide de bonnes pratiques pour l'établissement et la validation des barèmes de traitements thermiques des produits appertisés dans leur emballage final- CTCPA-centre technique agroalimentaire juin 2016. 2ème édition.
- Hazard Analysis and Risk-Based Preventive Controls for Human Food: Guidance for Industry, Draft Guidance U.S. Department of Health and Human Services Food and Drug Administration, Center for Food Safety and Applied Nutrition, January, 2018.
- Joint FAO/WHO Food Standards Programme- Codex Committee on Food Hygiene 4-th session – Lima, Peru, 17-21 November 2014 Discussion paper on the need for a revision of general principles of food hygiene (CAC/RCP 1-1969).

Normes

- NF V01-002 : Mise à jour décembre 2015 - Hygiène des aliments- Glossaire français-anglais.
- NF V01-006 (aout 2008). Hygiène des aliments - Place de l'HACCP et application de ses principes pour la maîtrise de la sécurité des aliments et des aliments pour animaux.
- ISO 22000 : Juin 2018 - Systèmes de management de la sécurité des denrées alimentaires – Exigences pour tout organisme appartenant à la chaîne alimentaire.
- NF ISO 11289 (décembre 1993). Produits alimentaires en conserves-détermination du pH.
- NF AFNOR NF V08-401 (octobre 1997). Microbiologie des aliments- contrôle de la stabilité des produits appertisés et assimilés (méthode de référence).
- NF AFNOR NF V08-408 (octobre 1997). Microbiologie des aliments- contrôle de la stabilité des produits appertisés et assimilés (méthode de routine).
- NF AFNOR NF V08-409 (octobre 1997). Microbiologie des aliments- contrôle de la stabilité des produits appertisés et assimilés (méthode de routine).
- NF AFNOR NF V08-602 (mai 2011). Microbiologie des aliments- dénombrement des spores dans les produits alimentaires avant traitement d'appertisation par comptage des colonies.

Publications

- André S., Zuber F., Montlahuc G. (2013a) Caractérisation des Valeurs Stérilisatrices des foies gras entiers et des blocs de foies gras. Actes des 10èmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras du 26 au 28 mars, 2013, La Rochelle, France, pp.460-464.
- André S., Zuber F., Remize F. (2013b). Thermophilic spore-forming bacteria isolated from spoiled canned food and their heat resistance. Results of a French ten-year survey. *Int. J. Food Microbiol.*, 165(2):134-143.
- Anses (2019). Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments / *Clostridium botulinum*, *Clostridium neurotoxinogènes*.

- Aryani DC, den Besten HMW, Hazeleger WC, Zwietering MH. 2015. Quantifying variability and the effect of growth history on thermal resistance of *Listeria monocytogenes*. *Int. J. Food Microbiol.* 193:130–38.
- Aryani DC, den Besten HMW, Zwietering MH. 2016. Quantifying variability in growth and thermal inactivation kinetics of *Lactobacillus plantarum*. *Appl. Environ. Microbiol.* 82(16):4896–908
- den Besten HMW., Wells-Bennik MHJ., Zwietering MH. (2018). Natural diversity in heat resistance of bacteria and bacterial spores: Impact on food safety and quality. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.*, 9:383-410.
- Diaou MM., André S., Membré JM. (2014). Meta-analysis of D-values of proteolytic *Clostridium botulinum* and its surrogate strain *Clostridium sporogenes* PA 3679. *Int. J. Food Microbiol.*, 174 :23-30.
- Poumeyrol G., Noel V., Morelli E. (2015). Guide méthodologique pour la validation de mesures de maîtrise des dangers microbiologiques – Application aux mesures de maîtrise relatives aux couples temps-température.
- Rigaux C., Denis JB., Albert I., Carlin F. (2013). A meta-analysis accounting for sources of variability to estimate heat resistance reference parameters of bacteria using hierarchical Bayesian modeling : estimation of D at 121,1°C and pH7, zT and zPH of *Geobacillus stearothermophilus*. *Int. J. Food Microbiol.* 161 :112-120.
- Wells-Bennik MHJ, Janssen PWM, Klaus V, Yang C, Zwietering MH, Den Besten HMW. Heat resistance of spores of 18 strains of *Geobacillus stearothermophilus* and impact of culturing conditions. *Int J Food Microbiol.* 2019 Feb 16;291:161-172. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.11.005. Epub 2018 Nov 10.

Liens utiles : exemples d'outils de mise en équation de résultats expérimentaux.

<https://cit.kuleuven.be/biotec/software/GinaFit>

<https://cran.r-project.org/web/packages/bioinactivation/vignettes/inactivation.html>

<https://foodlab-upct.shinyapps.io/bioinactivationFE/>

Annexe

Exemples de données FDA⁹: inactivation de *Listeria monocytogenes*

Température à cœur du produit (°C)	taux légal = effet de destruction pendant 1mn L= $10^{(T-70)/Z}$	temps nécessaire (minutes) pour obtenir un effet de réduction de la population bactérienne de 6 réductions décimales (6D)
63	0.117	17.0
64	0.158	12.7
65	0.215	9.3
66	0.293	6.8
67	0.398	5.0
68	0.541	3.7
69	0.736	2.7
70	1.000	2.0
71	1.359	1.5
72	1.848	1.0
73	2.512	0.8
74	3.415	0.6
75	4.642	0.4
76	6.310	0.3
77	8.577	0.2
78	11.659	0.2
79	15.849	0.1
80	21.544	0.09
81	29.286	0.07
82	39.810	0.05
83	54.116	0.03
84	73.564	0.03
85	100.000	0.02

⁹ <https://www.fda.gov/downloads/Food/GuidanceRegulation/UCM252447.pdf>