

**APPRECIATION QUANTITATIVE DU RISQUE (AQR) DE *CLOSTRIDIUM*
BOTULINUM DANS LES CONSERVES DE FOIE GRAS PRODUITES EN FRANCE**

**Membré Jeanne-Marie^{1,2}, Diao Moctar^{1,2}, Thorin Chantal²,
Cordier Grégoire³, Zuber François⁴, André Stéphane^{4*}**

¹INRA, UMR1014 Secalim, Nantes, F-44307, France

²LUNAM Université, Oniris, Nantes, F-44307, France

³CTCPA, pôle technologie, 11 Rue Marcel Luquet, 32000 Auch, France

⁴CTCPA, Unité de microbiologie EMaiRIT'S, 449 avenue Ader, 84911 Avignon, France

sandre@ctcpa.org

RÉSUMÉ

Le principal danger microbien associé aux conserves non acides est *Clostridium botulinum*. Il est généralement admis qu'un traitement thermique équivalent à 3 minutes à 121°C (Fo = 3 min) conduit à une inactivation de 12 log des spores de *C. botulinum*. Toutefois, certains produits en conserves, comme le foie gras, qui présente par ailleurs un historique de conformité excellent (aucun cas de botulisme signalé dans les dix dernières années en France), reçoivent un traitement thermique inférieur. Les données épidémiologiques n'apportant pas de preuves suffisantes de leur sécurité sanitaire, il a été décidé de construire un modèle d'Évaluation Quantitative du Risque afin d'évaluer le risque potentiel lié à *C. botulinum* dans les conserves de foie gras.

Le modèle a relié la contamination potentielle des matières premières et l'effet du traitement thermique sur l'inactivation et l'inhibition de spores, à l'objectif de sécurité alimentaire (Food Safety Objective - FSO). Dans les matières premières, la prévalence de *C. botulinum* était inférieure à 1%. La thermorésistance a été estimée grâce à une méta-analyse. L'effet inhibiteur du traitement thermique, associé aux caractéristiques du produit, a été modélisé à partir de challenge-tests (28 lots différents). Avec l'ensemble de ces données, la probabilité d'avoir une portion de foie gras en conserve (Fo appliquée à cœur de 0,5 min) contenant encore au moins une spore capable de germer, a été estimée à 4.52E⁻¹⁰ (-9,34 log). En parallèle, les données épidémiologiques ont servi à estimer un niveau approprié de Protection (Appropriate Level Of Protection - ALOP) et d'en déduire un FSO estimé à 1.42E⁻⁹ (-8,85 log). Il a donc été conclu que le procédé de conservation du foie gras en conserve, avec l'application d'une valeur stérilisatrice minimale de 0,5 min, permet la maîtrise du risque lié à *C. botulinum*.

ABSTRACT

The main microbial danger associated to low acid canned food is *Clostridium botulinum*. It is generally admitted that a thermal treatment equivalent to 3 minutes at 121°C (Fo = 3 min) leads to an inactivation of 12 log of *C. botulinum* spores. However, specific canned foods, such as the foie gras (fatty duck liver), which has an excellent history of food safety (no case of botulism during the last ten years in France related to this product), receives a lower thermal treatment. As epidemiological data do not provide sufficient evidences of their sanitary safety, it was therefore decided to build a model of Quantitative Microbiological Risk Assessment to estimate the potential risk associated with *C. botulinum* in canned foie gras. The built AQR model connected the potential contamination of raw materials and the effects of the heat treatment on both the inactivation and the inhibition of spores, to the Objective of Food Security (FSO).

In raw materials, prevalence of *C. botulinum* was lower than 1 %. The heat resistance was estimated by meta-analysis. The inhibitory effect of the thermal treatment, associated to the characteristics of the product, was modelled using challenges-tests (28 different batches). With all these data, the probability to have a portion of canned foie gras (heat treated with Fo = 0.5 min at cold point) still containing at least one spore capable to germinate, was estimated to 4.52E⁻¹⁰ (-9,34 log). In parallel, the epidemiological data were used for estimating an Appropriate Level Of Protection (ALOP), then calculating a required FSO estimated to 1.42E⁻⁹ (-8,85 log). It was then concluded that the canning process used for foie gras, with the application of a minimal Fo of 0.5 min, allows food safety risk control for *C. botulinum*.

INTRODUCTION

Il est généralement admis qu'un traitement au moins équivalent à une température de 121° C pendant 3 min (conférant une Valeur Stérilisatrice de 3 min) permet une inactivation d'un ordre de grandeur de 12 log des spores de *C. botulinum* protéolytique, et il s'agit d'un standard pour le traitement par la chaleur des aliments peu acides stables à l'ambiance. Toutefois, certains produits de conserve, avec un historique de sécurité excellent, reçoivent un traitement thermique inférieur à cette valeur stérilisatrice de 3 min.

Par exemple, le traitement microbiologiquement sûr de la charcuterie nitrifiée en conserve (pâté) s'appuie sur un traitement thermique doux en combinaison avec la présence de sel nitrifié dans la formulation, pour empêcher la croissance et la formation de toxines à partir d'un niveau faible de spores (Anderson et al., 2011). De même, bien que traitées thermiquement assez faiblement, les conserves de foie gras présentent une sécurité éprouvée : aucun cas de botulisme attribué à ce produit n'est signalé dans les dix dernières années en France, où 90 % de la production française est vendue (source : Institut Français de Veille Sanitaire (INVS, 2013)). De plus, aucun cas n'a été rapporté dans la littérature (www.promedmail.org, www.eurosurveillance.org, www.ncbi.nlm.nih.gov et archive.org) qui recense plus de 700 cas de botulisme alimentaire de 1918 à 2013.

Toutefois, les données épidémiologiques n'apportent, à elles seules, pas de preuves suffisantes pour tirer des conclusions définitives sur la sécurité sanitaire des aliments. Il a donc été décidé de construire un modèle d'Appréciation Quantitative de Risque Microbien (AQRM) afin d'évaluer le risque potentiel lié à *C. botulinum* protéolytique dans les conserves de foie gras. Il n'y a seulement que quelques modèles d'AQRM sur *C. botulinum* et la plupart de ces études ont surtout porté sur des *C. botulinum* non protéolytiques (Harrison et al., 1996 ; Smelt et al., 2013). Barker et al., (2002) ont construit une évaluation de l'exposition à l'aide d'un réseau bayésien. Récemment, dans leur étude approfondie sur *C. botulinum* protéolytique, Anderson et al. (2011) ont connecté mathématiquement la contamination initiale de la matière première (H0) et l'effet du traitement thermique sur l'inactivation microbienne (□R) et l'inhibition des spores (□I), avec l'objectif de sécurité alimentaire (Food Safety Objective : FSO).

Le premier objectif de ce travail était de construire un modèle d'AQRM, depuis la contamination potentielle des matières premières jusqu'au nombre de personnes malades, afin d'estimer le risque associé à *C. botulinum* protéolytique dans les conserves de foie gras en France. Une attention particulière a été portée à l'effet du traitement thermique global incluant l'inactivation thermique, mais aussi le stress thermique post-traitement qui a été également pris en

compte. Le fait de tenir compte de l'inactivation thermique et du stress thermique post-traitement a été décrit par Pivnick et Petrasovits (1973) en ce qui concerne la sécurité des conserves nitrifiées. Il a été développé par Hauschild et Simonsen (1985) pour estimer la « protection » de l'aliment, basée sur la probabilité pour des spores, qui survivent au processus thermique, de surmonter l'inhibition, croître et produire des toxines.

Le second objectif de ce travail était d'utiliser les données épidémiologiques provenant de l'Institut National de Veille Sanitaire, au cours de la période 2001-2012 (INVS, 2013), pour estimer un niveau approprié de protection (Appropriate Level Of Protection : ALOP). Cette analyse se fonde sur l'hypothèse qu'un petit nombre limité de cas d'une maladie, par million d'habitants, est jugé acceptable et pourrait être alors assimilé à un ALOP (EFSA, 2007 ; Gkogka et al., 2013). Les sorties du modèle de l'AQRM et de l'analyse des données épidémiologiques ont été alors comparées afin de déterminer si les pratiques actuelles concernant le traitement thermique de conserves de foie gras suffisent à contrôler le risque de *C. botulinum* dans ces produits ou, à l'inverse, si des options alternatives de gestion axées sur les risques devraient être proposées.

1. MATERIELS ET METHODES

1.1. Contaminations initiales des foies gras : données industrielles

Un échantillonnage a été réalisé durant 9 mois avec l'aide de 14 conserveurs français, représentatifs de conserveries de différentes tailles, incluant les trois plus importants groupes. 372 échantillons de foies gras ont été collectés, juste avant traitement thermique d'appertisation, puis congelés pour être envoyé au CTCPA pour analyse.

Un dénombrement direct et spécifique de *C. botulinum* n'étant pas possible, différentes étapes successives ont été conduites : en premier lieu, un dénombrement des spores de bactéries anaérobies (selon la norme NF V 08-602 (AFNOR, 2011) avec un changement de la température de traitement) ; puis seules les colonies noires, correspondant à des clostridies, ont été dénombrées. Sur celles-ci, une identification, à l'aide d'un séquençage partiel de l'ADN 16S, a été effectuée. Enfin, pour tous les isolats identifiés comme *C. sporogenes* / *C. botulinum*, une identification spécifique de gènes de *C. botulinum* a été menée (Woudstra et al., 2012).

1.2. Collecte et exploitation des données d'inactivation thermique de *C. botulinum* et *C. sporogenes*

Les données de thermorésistance de *C. botulinum* et de *C. sporogenes* (Durées de réduction décimale D (min) et facteur d'activation thermique z (°C)) sont nécessaires à la construction du modèle AQRM. Ces valeurs ont été déterminées par une méta-analyse bibliographique (Diao et al. 2014).

1.3. Recouvrement des spores endommagées traitées thermiquement : challenge tests procédé et produit pratiqués avec *C. sporogenes* dans le foie gras.

Il n'est pas possible pour des raisons de sécurité des personnels, de manipuler en halle pilote des germes aussi pathogènes que *C. botulinum*. L'étude de « challenge tests » a donc été menée avec *C. sporogenes*, substitut à *C. botulinum* présentant des caractéristiques très voisines.

L'objectif de l'étude par « challenge tests » était de mesurer l'impact du traitement thermique ($F_0 = 0,3 ; 0,5 ; 0,8$ min) et de la teneur en nitrite (0 ou 42 ppm dans le produit fini), sur la faculté pour des spores de *C. sporogenes* de survivre, germer et se développer dans le foie gras appertisé et donc rendre le produit non-stable. Les intensités de traitement et la teneur en nitrite choisies reflètent les usages industriels en France. Les expérimentations ont été menées avec un inoculum bas : 10 à 10² spores/g, ou élevé : 10⁴ à 10⁵ spores/g. Les suspensions de spores ont été préparées suivant la norme NF T 72-231 (AFNOR, 1998). Au total, 28 lots différents correspondant à autant de conditions expérimentales ont été réalisés.

Les foies gras inoculés ont été répartis dans des contenants de 200g : bocaux en verre avec couvercles métalliques pour les foies gras entiers ou boîtes métalliques pour les blocs de foie gras. Un ensemble de 60 échantillons a été produit pour chaque condition expérimentale.

Les produits ont été traités en autoclave statique en immersion dans de l'eau surchauffée, à 105°C. Les barèmes ont été ajustés en durée (monitoring des températures à cœur par des sondes de température aiguilles thermocouples), cela afin d'appliquer la valeur stérilisatrice souhaitée et précise au point critique du produit, après le cycle complet d'appertisation : chauffage puis refroidissement.

La stabilité biologique des échantillons a été mesurée suivant la norme NF V 08-408 (AFNOR, 1997).

Les données ont été analysées statistiquement à l'aide d'une régression linéaire généralisée avec, en entrée, le nombre d'échantillons de foie gras non-stables et le nombre total d'échantillons. La régression a permis d'estimer la probabilité qu'un échantillon soit non-stable, en fonction du barème thermique appliqué, et de l'ajout ou non de sel nitrité. Sous l'hypothèse

qu'un échantillon est non-stable si au moins une spore est capable de germer et d'ensuite se multiplier, et connaissant le nombre initial de spores présents dans chaque échantillon, il était alors possible d'estimer la probabilité, P_R , qu'une spore germe et se multiplie.

1.4. Modèle d'AQRM pour *C. botulinum* dans le foie gras

Les différentes grandeurs collectées (contamination initiale des foies ; inactivation et inhibition thermique conduisant au non-recouvrement des spores) ont été incorporées dans un modèle probabiliste.

La valeur de sortie du modèle est exprimée comme le nombre de portions de foie gras appertisé contenant encore au moins une spore de *C. botulinum* viable et capable de germer et de se développer dans le produit fini. Afin de compléter le modèle jusqu'à obtenir une estimation du risque sanitaire botulique pour la population (nombre potentiel de cas par habitant), les données sur les habitudes de consommation (données fournies par le CIFO) et le facteur dose-réponse ont également été collectées.

1.5. Données épidémiologiques durant la période 2001-2012

En France, les cas de botulisme sont déclarés et enregistrés chaque année par l'Institut National de Veille Sanitaire (INVS, 2013). Les données sur 12 ans (période 2001-2012) ont été exploitées pour estimer le nombre moyen de cas par million d'habitants (sur la base de 65 millions en France). Un faible niveau constaté de cas de botulisme permet ainsi de fixer un niveau de protection requis (ALOP) assez bas.

1.6. Mise au point du modèle AQRM et simulation des combinaisons des facteurs, par la méthode de Monte Carlo.

Le modèle AQRM a été construit avec le logiciel Excel™. Certaines variables probabilistes ont été introduites comme facteur de variabilité, (par exemple la concentration en spores de *C. botulinum* dans les foies gras crus contaminés), d'autres comme grandeurs d'incertitudes (par exemple le pourcentage de foies gras contaminés par *C. botulinum*). Par ailleurs, des hypothèses de type « cas le plus défavorable » ont été faites, comme par exemple : une capacité de recouvrement pour *C. botulinum* similaire à celle de *C. sporogenes* après traitement thermique ; l'hypothèse qu'une seule spore survivante et viable dans une portion de foie gras appertisé est susceptible de générer un cas de botulisme, etc...

En conséquence, pour faciliter l'interprétation du modèle et éviter les confusions entre les deux types de données d'entrées (Nauta, 2000), il a été décidé de ne

conserver dans le modèle comme données d'entrée, que les données estimées suivant leur variabilité, et de fixer les grandeurs d'incertitude à leur valeur moyenne.

Pour exploiter le modèle, une simulation de Monte Carlo a été appliquée en utilisant l'application logicielle @Risk (version 6.1.2). Pour chaque simulation, $10E^8$ itérations ont été menées. La valeur de sortie du modèle est exprimée, pour chaque combinaison de facteurs testée, sous forme de probabilité de cas de botulisme par million d'habitants et par an, en lien avec la consommation de foie gras appertisé.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats sont exposés dans les tableaux 1 et 2. Pour une Valeur Stérilisatrice de 0,5 min, la probabilité, P_R , qu'une spore germe et se multiplie a été estimée à la valeur de 9.5×10^{-8} . Le nombre de portions de foie gras contenant au moins une spore de *C. botulinum* capable de germer, donnant ensuite une cellule capable de se multiplier, a été estimée à la valeur de 4.52×10^{-10} portions. La probabilité de déclencher la maladie a ainsi été estimée à une valeur extrêmement faible : 7.96×10^{-10} par habitant et par an. Ces résultats reposent sur un modèle d'AQRM prenant en compte quatre éléments clés : la contamination de la matière première, l'effet global de traitement thermique (destruction et récupération), le mode de consommation et enfin la relation dose-effet.

La contamination des matières premières a été évaluée à l'aide de données recueillies chez les fabricants. En l'absence d'une contamination observable en *C. botulinum* (fréquence et concentration) dans du foie gras, plusieurs hypothèses ont été formulées. Les données de concentration en *Clostridium* sp ont été considérées comme représentatives du niveau potentiel de concentrations de *C. botulinum* dans le foie gras cru. La fréquence de contamination de *C. botulinum* a été assimilée à la fréquence de *C. sporogenes* / *C. botulinum*, c'est-à-dire qu'il y a eu une surestimation systématique de la fréquence de *C. botulinum*. En effet, il a été décidé de ne pas utiliser les données d'identification de *C. botulinum* (0 parmi les 8 colonies) en raison de la grande incertitude générée par un petit échantillon.

Concernant l'effet du traitement thermique, le principe de combiner l'effet quantitatif de l'inactivation thermique et l'effet du stress post-traitement sur la probabilité de *C. botulinum* à se développer a été fondé sur des travaux similaires précédemment rapportés dans la littérature (Hauschild, 1982 ; Lund, 1993 ; Pivnick et Petrasovits, 1973) : $DoP = D_s + I_n$, où DoP est le degré de Protection, D_s le log de la destruction et I_n le log de l'inhibition des spores botuliques.

DoP a été en outre expliqué par Hauschild et Simonsen (1986): $Pr = \log(1/P)$, où P est la probabilité qu'une spore prise individuellement, survive au cours de son exposition progressive à la chaleur, puis surmonte l'inhibition et germe avant finalement de croître et de produire de la toxine. Cette probabilité, P, repose sur l'intensité du traitement thermique, mais aussi sur la formulation d'aliments (Lund, 1993).

En l'absence de données permettant de quantifier l'effet inhibiteur sur *C. botulinum* dans le foie gras, un ensemble de données recueillies sur *C. sporogenes* a été utilisé. Dans cette étude, la souche de référence PA 3679 n'a pas été sélectionnée car elle n'était pas capable de se développer après un traitement thermique même très faible (VS de 0,3 min).

Au lieu de cela, une souche sauvage de *C. sporogenes* isolée de graisse de canard non-stable a été utilisée. Ceci a pu conduire à une sous-estimation de l'effet inhibiteur de l'aliment sur les spores, vu que notre souche était plus thermorésistante que la souche PA3679, elle-même plus résistante à la chaleur que le *C. botulinum* (Brown et al., 2012. Diao et al., 2014).

Dans notre étude, nous avons démontré que l'inhibition de spores de *C. sporogenes* était imputable au traitement thermique (sur une plage de VS allant de 0,3 à 0,8 min). De plus, nous avons démontré que pour une VS de 0,3 min, l'ajout de nitrite (42 ppm) permettait d'inhiber tout au moins partiellement les spores de *C. sporogenes* (résultats non montrés ici).

À ce stade, il est important de souligner que le modèle de l'AQRM a été construit pour une VS de 0,5 min sans tenir compte d'un effet spécifique du nitrite. Ce niveau de stérilisation est appliqué avec succès à plus de 80% de la production française des conserves de foies gras pour ne pas dégrader la qualité organoleptique (données communiquées au CTCPA par les industriels de la filière foie gras). Le fait d'avoir construit ainsi le modèle AQRM (indépendamment d'un effet nitrite) rend la comparaison possible avec les données épidémiologiques en France, puisque sur ce marché existent à la fois des produits de foies gras en conserve avec ou sans nitrite.

Le modèle de l'AQRM comprend également certaines hypothèses concernant le mode de consommation. Les données fournies par le CIFOG proviennent du marché français, bien étudié, données qui présentent ainsi l'avantage d'être assez précises et sans trop d'incertitude. L'inconvénient, cependant, est qu'en cas d'exportation vers un autre pays, le modèle devrait être adapté. Enfin, la relation dose-effet retient l'hypothèse la plus pessimiste : chaque spore survivante est considérée capable de germer et croître

et de produire assez de toxine pour rendre un consommateur malade. Cette hypothèse est évidemment très conservatrice, elle apporte une marge de sécurité dans l'analyse.

L'étude visait deux objectifs : d'une part, quantifier le risque associé à *C. botulinum* protéolytique dans les conserves de foie gras en France à l'aide d'un modèle de l'AQRM ; et d'autre part, estimer les ALOP et FSO grâce aux données épidémiologiques. Les valeurs estimées étaient respectivement 2.49×10^{-3} malades par million d'habitants par an, et 1.42×10^{-9} portions de foie gras contenant des spores de *C. botulinum* capables de germer pour donner ensuite des cellules capables de se multiplier.

Ainsi, le nombre de portions contenant au moins une spore capable de germer (estimé par le modèle d'AQRM) pouvait être comparé au FSO obtenu à partir des données épidémiologiques : en expression logarithmique, -9.34 à comparer à un FSO de -8.85 (calcul non détaillé ici).

Malgré plusieurs hypothèses conservatrices, la valeur de sortie de l'AQRM était plus faible que les chiffres basés sur l'analyse des données épidémiologiques. Ce résultat est satisfaisant dans un cadre de gestion de sécurité alimentaire fondé sur le risque (FSO est la concentration maximale ou la prévalence à ne pas dépasser).

Fait intéressant, les deux types de résultats ont été estimés dans le même ordre de grandeur : la «prévalence théorique dans l'assiette du consommateur» et le FSO sont différents seulement

d'un demi-log. Cela pourrait être utilisé comme une preuve de la validation du modèle AQRM développé (Gkogka et al., 2013), même s'il est généralement reconnu que l'utilisation de données épidémiologiques pour la validation d'une étude d'évaluation de risque, reste difficile en raison de l'incertitude inhérente à l'analyse des données épidémiologiques. Néanmoins, la convergence observée entre les résultats fournis par l'approche «bottom-up» (AQRM) et l'approche «top-down» (analyse des données épidémiologiques) pourrait inciter les gestionnaires des risques à utiliser cette information dans les décisions future de gestion de la sécurité sanitaire des aliments.

En conclusion, les pratiques actuelles des industriels français pour la production de conserves de foie gras peuvent être considérées comme appropriés et sûres pour permettre une maîtrise du risque *C. botulinum* dans ce type de produits. Un traitement à 105°C avec une durée adaptée, tel que pratiqué de façon usuelle à l'échelle industrielle, peut être utilisé pour garantir les qualités organoleptiques du foie gras sans compromettre la sécurité alimentaire.

3. CONCLUSION

Les données, et le modèle en découlant, apportent la preuve qu'un traitement thermique d'appertisation conférant une Valeur Stérilisatrice d'au moins 0,5 min à cœur, est sûr, nécessaire et suffisant vis-à-vis du risque *C. botulinum* pour les conserves de foies gras.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Anderson, N.M., Larkin, J.W., Cole, M.B., Skinner, G.E., Whiting, R.C., Gorris, L.G.M., Rodriguez, A., Buchanan, R., Stewart, C.M., Hanlin, J.H., Keener, L., Hall, P.A., 2011. *J. Food Prot.* 74, 1956-1989.
2. Barker, G.C., Talbot, N.L.C., Peck, M.W., 2002. *Int. Biodeterioration Biodegrad.* 50, 167-175.
3. Brown, J.L., Tran-Dinh, N., Chapman, B., 2012. *J. Food Prot.* 75, 779-792.
4. Christiansen, L.N., Tompkin, R.B., Shaparis, A.B., Kueper, T.V., Johnston, R.W., Kautter, D.A., Kolari, O.J., 1974. *App. Microbiol.* 27, 733-737.
5. Diao, M.M., André, S., Membré, J.-M., 2014. *Int. J. Food Microbiol.* 174, 23-30.
6. EFSA, 2007. *EFSA J.* 462, 1-29.
7. Gkogka, E., Reij, M.W., Gorris, L.G.M., Zwietering, M.H., 2013. *Food Control* 29, 382-393.
8. Harrison, M.A., Garren, D.M., Huang, Y.-W., Gates, K.W., 1996. *J. Food Prot.* 59, 257-260.
9. Hauschild, A.H.W., 1982. *Food Technol.* 36, 95-104.
10. Hauschild, A.H.W., Simonsen, B., 1985. *J. Food Prot.* 48, 997-1009.
11. Hauschild, A.H.W., Simonsen, B., 1986. *Food Technol.* 40, 155-158.
12. INVS. 2013. Available at <http://www.invs.sante.fr/> (Accessed: 06/08/2014).
13. Lund, B.M., 1993. *J. Ind. Microbiol.* 12, 144-155.
14. Nauta, M.J., 2000. *Int. J. Food Microbiol.* 57, 9-18.
15. Pivnick, H., Petrasovits, A. 1973. XIX Réunion Euro. Cher. Viande., France. 1081-1096.
16. Smelt, J.P., Stringer, S.C., Brul, S., 2013. *Food Control* 29, 358-363.
17. Woudstra, C., Skarin, H., Anniballi, F., Fenicia, L., Bano, L., Drigo, I., Koene, M., Bâyon-Auboyer, M.H., Buffereau, J.P., De Medici, D., Fach, P., 2012. *Appl. Environ. Microbiol.* 78, 3120-3127.

Tableau 1. Structure du modèle probabiliste permettant une évaluation du nombre de portions (30g) de foie gras appertisé contenant au moins une spore de *C. botulinum* survivante et viable après traitement thermique.
Exemple de calcul présenté pour une valeur stérilisatrice à cœur de 0,5 minute.

Étape du modèle	Définition des variables	Résultat (Espérance)
Contamination de la matière première crue, H0	Prévalence de <i>Clostridium</i> sp. (%)	13.7
	Prévalence de <i>C. botulinum</i> / <i>C. sporogenes</i> (%)	8.2
	Prévalence (corrigée) de <i>C. botulinum</i> (%)	1.1
	Niveau de contamination par portion (30 g)	147
Inactivation thermique ΣR	Temps équivalent (min) passé à 105°C pour une VS = 0,5 min.	20.37
	Niveau d'inactivation (en log ₁₀)	2.26
	Probabilité de survie au traitement thermique	0.0055
	Nombre de portion contenant encore au moins une spore survivante viable, après appertisation, parmi toutes les portions	0.0029
Inhibition après traitement thermique ΣI	Probabilité, P _R , qu'une spore germe et se multiplie	9.5 x 10 ⁻⁸
	Inhibition globale (exprimée en log ₁₀)	-7.02
	Nombre de portion (parmi les portions contaminées initialement) contenant encore au moins une spore capable de germer, et pour les cellules, de se multiplier	4.00 x 10 ⁻⁸
	Nombre de portions contenant encore au moins une spore capable de germer puis pour les cellules de se multiplier	4.52 x 10⁻¹⁰

Tableau 2. Estimation de la probabilité de cas de botulisme par habitant et autres expression des valeurs de sortie du modèle, permettant une comparaison du modèle AQRM avec les données épidémiologiques
Exemple de calcul présenté pour une valeur stérilisatrice à cœur de 0,5 minute.

Définition des variables	Résultats
Nombre de portions contenant encore au moins une spore capable de germer, et pour les cellules de se multiplier	4.52 x 10 ⁻¹⁰
Probabilité de contracter le botulisme en consommant le produit	4.52 x 10 ⁻⁹
Probabilité de cas de botulisme par habitant	7.96 x 10⁻¹⁰