

L'évaluation quantitative du risque microbiologique : revue de trois modèles liées à *Salmonella* dans les aliments

DELHALLE L.¹, SAEGERMAN C.², FARNIR F.³, KORSAK N.¹, DAUBE G.¹

¹ Département des Sciences des Denrées alimentaires, bâtiment B43bis,

² Département des Maladies infectieuses et parasitaires. Epidémiologie et Analyse de Risques appliquées aux Sciences vétérinaires, Bâtiment B42,

³ Département de Productions animales. Biostatistique, économie, sélection animale. Bâtiment B43, Université de Liège, Faculté de Médecine Vétérinaire, Boulevard de Colonster, 20 à 4000 Liège, Belgique.

Correspondance : Laurent Delhalle – Tél +32(0)4/366.40.57 – Fax +32(0)4/366.40.44 – E-mail: l.delhalle@ulg.ac.be

RESUME : Suite aux accords internationaux et à la modification de la législation européenne, l'analyse de risque est devenue une démarche systématique pour la maîtrise de la sécurité de la chaîne alimentaire. Le risque microbien dans la chaîne alimentaire et ses conséquences au niveau de la santé publique peuvent être estimés et gérés plus efficacement. Cet article de synthèse donne une description générale des principes de l'analyse de risque sur base des travaux de la commission du *Codex Alimentarius*. Cette synthèse met en lumière les avantages et inconvénients de l'utilisation de l'analyse de risque et également les problèmes rencontrés pour réaliser un modèle complet « de la fourche à la fourchette ». Le risque lié à *Salmonella* dans les denrées alimentaires est pris comme exemple afin d'illustrer la démarche complète d'évaluation quantitative de risque. Deux modèles concernant le poulet de chair et les œufs développés par l'Organisation Mondiale de la Santé et l'organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et un troisième modèle concernant la viande de porc développé par l'Agence des Laboratoires vétérinaires du Royaume-Uni sont étudiés. Une analyse des méthodes utilisées pour la construction de ces trois modèles est également présentée. L'intérêt de ces trois modèles est qu'ils abordent les options de gestion du risque pour limiter la propagation d'infections d'origine alimentaire. Ils donnent également la valeur du risque final pour une population suite à la consommation des denrées concernées. Ces modèles sont des outils précieux pour les responsables de santé ainsi que pour les industries alimentaires.

1. INTRODUCTION

L'analyse de risque a obtenu une reconnaissance internationale depuis une dizaine d'années. Un nombre croissant de publications est consacré chaque année à cette méthodologie. Cette démarche scientifique s'inscrit dans le cadre d'une demande pour une sécurité accrue de la chaîne alimentaire de la part des autorités publiques et des consommateurs. Cette demande est d'autant plus forte que, durant ces dernières années, des crises alimentaires majeures, telles que la crise de la dioxine dans la viande de poulet, l'encéphalopathie spongiforme bovine ou *Listeria monocytogenes* dans

les fromages au lait cru, ont ébranlé la confiance du consommateur (Moll et Moll, 2000 ; 2002).

Cependant, l'analyse de risque reste actuellement encore méconnue par l'ensemble de la communauté scientifique et des responsables en charge de la sécurité sanitaire de la production des aliments. Plusieurs raisons sont à l'origine de cette situation mais c'est surtout la démarche multidisciplinaire, ayant recours aux principes de l'épidémiologie, de statistique, de microbiologie, de technologie alimentaire et de programmation informatique qui rend cette discipline ardue (Schlundt, 2002).

L'analyse de risque permet de donner des réponses aux responsables de la santé, aux vétérinaires et aux industriels. Cette discipline permet de déterminer le risque pour une population donnée face à un danger, d'estimer le nombre de cas liés suite à l'ingestion d'une denrée contaminée, de simuler les conséquences d'un accident dans la chaîne alimentaire, de présenter les mesures de prévention efficaces, de proposer des scénarii possibles afin de réduire le nombre de cas et les coûts associés, d'évaluer l'implémentation de mesures de gestion comme des critères de performance (par exemple, des niveaux admissibles de contamination

microbienne) ou des critères de traitement (par exemple une durée ou une température à une étape donnée), etc. L'analyse de risque peut être un guide quantitatif utile pour les prises de décision si elle s'appuie sur des études scientifiques solides et si elle est complétée par des décisions industrielles, sociales et politiques qui prennent en compte les limites de cette méthode (Comité Scientifique de l'Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire, 2005). À l'heure actuelle, encore peu d'évaluations quantitatives de risques microbiologiques ont été développées en Belgique. Citons le projet METZOON qui étudie *Salmonella* dans la viande de porc à partir de la production primaire jusqu'au modèle dose-réponse (Bollaerts *et al.*, 2008 ; Delhalle *et al.*, 2008), le modèle concernant *Campylobacter* dans les volailles à partir de la vente au détail jusqu'au risque final pour le consommateur (Uyttendaele *et al.*, 2006) et le modèle concernant *Salmonella* Enteritidis dans les œufs (Grijnspeerdt *et al.*, 2005).

Les objectifs de cette synthèse sont de décrire des principes généraux de l'analyse de risque suivant les travaux de la commission du *Codex Alimentarius* et de donner trois exemples concrets d'évaluation quantitative de risque microbiologique concernant le risque de transmission à l'homme de *Salmonella* via les aliments.

2. HISTORIQUE ET BASE LÉGALE DE L'ANALYSE DE RISQUE

En 1994, l'Organisation mondiale du Commerce (OMC) a conclu un accord pour l'application des mesures sanitaires et phytosanitaires (*sanitary and phytosanitary measures* (SPS *measures*)) dont les objectifs sont d'éviter les entraves au commerce international et d'instituer des règles selon lesquelles un pays peut refuser de commercialiser un produit sur son territoire s'il présente un risque pour la population (Organisation mondiale du commerce, 1994). La justification du refus de commercialisation d'une denrée alimentaire doit se fonder sur une analyse de risque basée sur des normes internationales reconnues par l'OMC. Le *Codex Alimentarius* et ses composantes techniques sont reconnus par l'OMC. Un des objectifs du *Codex Alimentarius* est d'instituer des normes et des références servant de base pour une analyse de risque (Rogy, 2002 ; Food and Agriculture Organization/World Health Organization, 2006).

En 1999, l'Union européenne a rédigé le Livre Blanc sur la sécurité alimentaire où les principes généraux de la politique européenne en matière de sécurité alimentaire y sont exposés (Commission des Communautés européennes, 2000). Dans ce texte fondateur, on insiste sur l'application et la mise en œuvre de l'analyse de risque et du respect des accords internationaux. Depuis lors, l'Union européenne a remplacé son ancienne législation par un ensemble de nouveaux règlements communément appelé « le paquet hygiène ». Parmi les différents règlements du paquet hygiène, c'est le règlement (CE) N°178/2002 établissant les principes généraux et les prescriptions générales de la législation alimentaire, appelé « General Food Law », qui met en place l'analyse de risque comme démarche systématique dans la sécurité alimentaire (Commission des Communautés européennes, 2002). Le règlement (CE) n°2073/2005 recommande des révisions des critères microbiologiques concernant les denrées alimentaires en tenant compte de l'évolution dans le domaine de la sécurité et de la microbiologie des denrées alimentaires. Cette évolution comprend les progrès scientifiques, technologiques et méthodologiques, l'évolution des niveaux de prévalence et de contamination, l'évolution de la population de consommateurs vulnérables ainsi que les résultats éventuels d'analyses de risque (Commission des Communautés européennes, 2005).

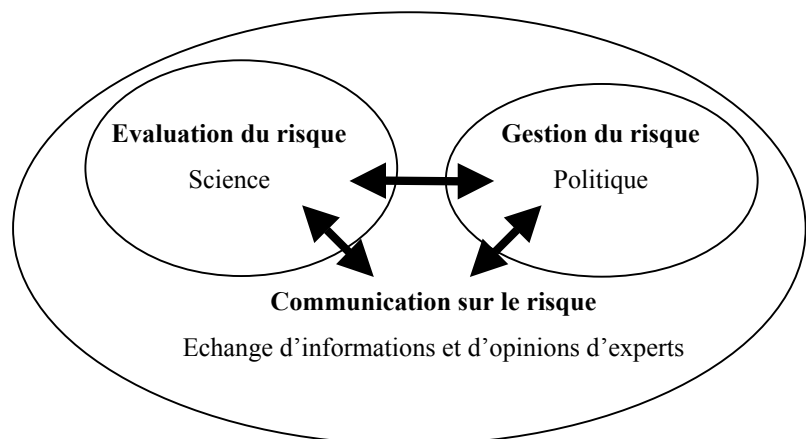
3. PRINCIPES GÉNÉRAUX DE L'ANALYSE DE RISQUE

Il est nécessaire de bien distinguer les notions de danger et de risque avant d'aborder l'analyse de risque. Un danger est défini comme étant un agent physique, chimique ou biologique présent dans un aliment pouvant causer un effet néfaste sur la santé. Un risque se définit comme étant une fonction de la probabilité d'un effet néfaste sur la santé et de la gravité de cet effet, résultant d'un (ou plusieurs) danger(s) dans un aliment (*Codex Alimentarius* Commission, 2007).

L'analyse de risque est définie comme une démarche scientifique établie dans le but d'identifier les dangers connus ou potentiels, d'en apprécier les risques, de les gérer et de communiquer à leur propos (Ahl *et al.*, 1993). Toma et collaborateurs (1991) décrivent l'analyse de risque comme une manière d'organiser les informations disponibles sur un événement potentiel donné, de les traduire en probabilités en tenant compte d'hypothèses, de la variabilité et de l'incertitude, et d'en déduire logiquement des décisions. Elle cherche à quantifier à la fois la probabilité et l'ampleur de conséquences négatives pour les individus ou les populations à partir de dangers spécifiques.

Une des difficultés rencontrées en santé animale et en santé publique vétérinaire est la coexistence de deux modèles de description et d'appellation des étapes de la démarche en analyse de risque : d'une part, le modèle de l'Organisation mondiale de la Santé animale (anciennement dénommé Office international des Epizooties) (OIE) (Covello et Merkhoffer, 1993) et d'autre part, le modèle du *Codex Alimentarius* issu du groupe de travail de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture et

Figure 1 : Interactions entre les processus d'évaluation, de gestion et de communication du risque (Feinberg *et al.*, 2006)



de l'Organisation mondiale de la Santé (FAO/OMS) (Organisation mondiale de la Santé, 1995). Le modèle le plus largement utilisé en hygiène alimentaire est celui du *Codex Alimentarius*.

Selon le *Codex Alimentarius*, une démarche complète d'analyse de risque comporte trois composantes interagissant entre elles : l'évaluation du risque (*risk assessment*), la gestion du risque (*risk management*) et la communication autour du risque (*risk communication*). Les acteurs du monde scientifique, réalisant l'évaluation de risque, et ceux de la gestion et de la communication du risque, qui, par essence, sont des composantes plus économiques et politiques, sont censés avoir des interactions simples comme l'illustre la figure 1. Cette vision schématique n'est cependant pas toujours transposable dans la réalité (*Codex Alimentarius* Commission, 2007). Dans cet article, c'est surtout l'étape d'évaluation du risque selon la nomenclature du *Codex Alimentarius* qui sera développée. Des brèves définitions de la communication du risque et de la gestion du risque sont néanmoins données (*Codex Alimentarius* Commission, 1999 ; Saegerman et Berkvens, 2007).

La communication du risque est un processus interactif d'échanges d'informations et d'opinions sur les risques entre les évaluateurs du risque, les gestionnaires du risque et les autres parties intéressées comme les consommateurs ou les industriels. C'est un processus continu permettant de partager d'informations entre les différents partenaires (Food and Agriculture Organization/World Health Organization, 2006).

La gestion du risque consiste à mettre en balance les différentes politiques possibles d'acceptation ou de réduction des risques évalués et de choisir la mise en œuvre des options les plus appropriées. Les mesures de gestion du risque découlent du processus d'évaluation du risque. Les acteurs de la gestion du risque peuvent être, soit les pouvoirs publics, soit des organisations privées (Food and Agriculture Organization/World Health Organization, 2006).

L'évaluation du risque est un processus scientifique se composant de quatre parties :

1. identification du danger : identification des agents biologiques, chimiques et physiques susceptibles de provoquer des effets néfastes pour la santé et qui peuvent être présents dans un aliment donné ou un groupe d'aliments. C'est une démarche qualitative qui consiste à

rassembler le maximum d'informations sur le problème à traiter.

2. caractérisation du danger : évaluation qualitative et/ou quantitative de la nature des effets néfastes sur la santé associés aux agents biologiques, chimiques et physiques qui peuvent être présents dans un aliment. C'est la détermination de la relation entre le degré d'exposition (dose) à un agent et la gravité et/ou la fréquence des effets néfastes qui en résulte sur la santé (réponse).

3. évaluation de l'exposition : évaluation qualitative et/ou quantitative de l'ingestion probable d'agents biologiques, chimiques et physiques par le biais des aliments ou d'autres sources.

4. caractérisation du risque : estimation qualitative et/ou quantitative, compte tenu des incertitudes inhérentes à l'évaluation de la probabilité et de la gravité des effets néfastes connus ou potentiels sur la santé susceptibles de se produire dans une population donnée, sur base de l'identification des dangers, de la caractérisation des dangers et de l'évaluation de l'exposition.

Une procédure classique d'analyse de risque selon le *Codex Alimentarius* pourrait se résumer comme dans la figure 2.

Une analyse de risque ne se conduit pas de manière linéaire, où une étape commence seulement lorsque l'étape précédente est achevée, mais plutôt avec des allers-retours entre les différentes composantes tout au long du processus d'analyse (Feinberg *et al.*, 2006). Le groupe de travail du *Codex Alimentarius* donne les principes et directives régissant la conduite de l'évaluation et, plus récemment, sur la gestion des risques microbiologiques (*Codex Alimentarius* Commission, 1999 ; *Codex Alimentarius* Commission, 2007). Comme cette discipline est toujours en développement, des aménagements sont encore possibles. Ces documents constituent une base de travail pour les gouvernements,

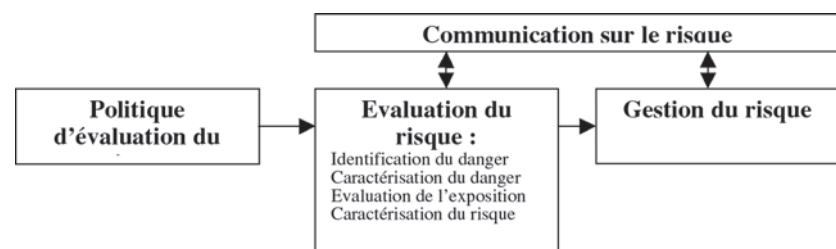
les responsables de la santé et les industriels.

4. L'ÉVALUATION QUANTITATIVE DU RISQUE

Dans un premier temps, il est nécessaire de construire un modèle schématique, appelé arbre d'événements, représentant autant que possible la réalité. Dans le cas d'une chaîne alimentaire, chaque étape de production est implémentée par ordre chronologique afin d'avoir une vue schématique du processus de fabrication (Nauta, 2001). Grâce à ce modèle il est possible de déterminer les informations à collecter aux différentes étapes. La collecte de données est souvent l'élément le plus difficile d'une évaluation quantitative de risque car plus le modèle sera détaillé, plus les données adéquates seront difficiles à obtenir. Pour pallier à l'éventuel manque de données, des jugements personnels ou des opinions d'experts sont utilisés mais ils sont sujets à controverse (Vose, 2000).

Une analyse quantitative de risque peut être modélisée soit de manière déterministe, où l'on utilise une valeur moyenne estimée pour chaque paramètre, ainsi que les extrêmes, soit de manière probabiliste, où l'on tient compte de la distribution de probabilité de chaque paramètre (Toma *et al.*, 1991). La méthode déterministe est plus simple et plus rapide à mettre en œuvre car les méthodes mathématiques sont plus abordables mais elle donne un résultat uniquement ponctuel. La méthode probabiliste nécessite des distributions de probabilités pour représenter soit la variabilité, soit l'incertitude sur un paramètre. Chaque variable entrant dans le modèle probabiliste sera remplacée par une loi de distribution selon la nature de la variable et du processus stochastique sous-jacent (Pouillot *et al.*, 2002). La caractérisation de certains processus aléatoires est parfois difficile à obtenir mais cette méthodologie conduit

Figure 2 : Procédure classique d'analyse de risque selon le *Codex Alimentarius* (Saegerman, 2005)



à une distribution de probabilité du risque et permet d'affiner l'interprétation des résultats issus du modèle.

Le modèle global est constitué d'une succession de modèles partiels, les variables de sortie à une étape servant potentiellement de variable d'entrée pour les étapes suivantes (Nauta, 2001). À chaque étape, on obtient donc une représentation déterministe ou probabiliste des paramètres de sortie (Vose, 2000 ; Pouillot *et al.*, 2002). Les différents modules, constituant les étapes du modèle, et qui établissent les relations entre variables d'entrée et de sortie, peuvent être construits à partir des données récoltées sur le terrain ou repris à partir de la littérature scientifique. Lorsque le modèle est construit, il est possible d'obtenir des distributions de probabilité des variables en utilisant les simulations de type Monte Carlo (Thrusfield, 2007). Cette méthode considère chaque valeur possible d'une variable et les poids de chaque valeur possible en fonction de la probabilité que cette valeur se produise. En d'autres termes, chaque variable est considérée comme échantillonnée dans sa distribution de probabilité. Pour produire un grand nombre de scénarii ou d'itérations, on fait appel à un échantillonnage aléatoire de chaque distribution de probabilité dans le modèle. Les distributions des variables du modèle dépendent généralement des valeurs échantillonnées pour d'autres variables en amont dans le modèle. En utilisant cette méthodologie, le modèle génère une distribution finale suite à la succession des variables des différents modules traduisant le risque intégrant toutes les sources de variation et d'incertitude rencontrées dans le processus (Pedro et Boris, 2005).

Pour illustrer ce principe avec un exemple dont la solution algébrique est connue, nous allons additionner deux variables indépendantes A et B, chacune représentée par une distribution normale, de moyennes égales à 20 et 10, et de déviations standard égales à 5 et 2 respectivement. Le résultat de cette addition est

la variable C, elle-même théoriquement normale, de moyenne 30 et de déviation standard 5.38 (figure 3). À l'aide du logiciel Palisade @risk (Palisade, 2004), un logiciel complémentaire de Microsoft Excel, il est possible de réaliser des simulations de type Monte Carlo. En fixant le nombre d'itérations, par exemple, à 10.000, nous obtenons la distribution finale issue de l'addition des variables A et B et représentée par la variable C.

Lorsque le modèle est programmé, vient ensuite l'étape de validation (Hoonstra *et al.*, 2001). Cette étape consiste à vérifier si le modèle est sans erreurs de calculs et/ou de programmation, si les valeurs prédites par le modèle sont comparables à la réalité et si le modèle rencontre les objectifs fixés au départ. Les données prédites issues du modèle peuvent être comparées à différentes étapes à des données de la littérature scientifique, de rapports ou de plans de surveillance officiels représentant la partie du modèle concernée.

Une fois le modèle terminé et validé, l'exploitation des résultats peut être réalisée notamment par une analyse de sensibilité et de scénario. L'analyse de sensibilité permet d'identifier les variables qui ont le plus d'influence sur un paramètre d'intérêt (Zwieterin et van Gerwen, 2000). Cette analyse peut être symbolisée sous la forme d'un graphique type tornade où la longueur des barres représente l'influence de la variable sur la variable d'intérêt (Palisade, 2004). L'analyse de scénario, connu également sous le nom de « *what-if scenario* », identifie les combinaisons de variables qui permettent d'obtenir au final une valeur cible sur un paramètre d'intérêt (Hoonstra et Notermans, 2001 ; Vose, 2005).

L'avantage de l'évaluation quantitative de risque est qu'elle permet de donner une valeur numérique du risque encouru par une population face à un danger. Elle permet également de donner des valeurs numériques concernant la variabilité et/ou l'incertitude sur les paramètres du modèle et donne des résultats plus fins qu'une évaluation qualitative

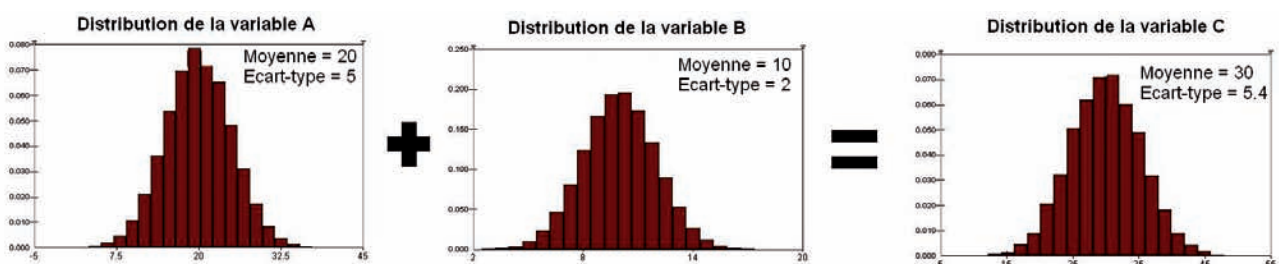
de risque. Elle permet d'évaluer les différentes options de gestion et d'estimer leurs conséquences (Hoonstra et Notermans, 2001 ; Vose, 2005). Enfin c'est une méthode permettant de synthétiser l'ensemble des données concernant un danger dans une chaîne alimentaire (Saegerman et Berkvens, 2007).

Cependant, une évaluation quantitative de risque exige un nombre important de données issues de sources fiables. Les aptitudes mathématiques et la théorie nécessaires à la réalisation d'un modèle sont également indispensables. Les itérations dans chaque paramètre du modèle exigent une puissance de calcul qui nécessite le recours à l'informatique. Le travail exigé pour la réalisation du modèle est parfois considérable et n'est pas toujours nécessaire car une analyse de risque qualitative peut répondre également de manière satisfaisante à certains objectifs. L'incertitude sur certains paramètres peut donner des conclusions erronées, il est donc indispensable d'identifier les points faibles du modèle en vue de pondérer les résultats (Comité Scientifique de l'Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire, 2005).

5. TROIS EXEMPLES D'ÉVALUATION QUANTITATIVE DE RISQUE MICROBIOLOGIQUE CONCERNANT *SALMONELLA* DANS LA CHAÎNE ALIMENTAIRE.

Les deux premières évaluations du risque sont liées à *Salmonella* dans les œufs et les poulets de chair. Elles ont été réalisées par le Service de la qualité des aliments et des normes alimentaires de la FAO et par le Département de sécurité sanitaire des aliments de l'OMS (Food and Agriculture Organization/World Health Organization, 2006), que nous désignons dans ce travail le modèle FAO/OMS. Les deux groupes ont collaboré pour développer deux évaluations quantitatives de

Figure 3 : Résultat de l'addition de deux distributions avec les simulations de type Monte Carlo



risque afin de l'appliquer tant au niveau national qu'international. Les risques sont estimés pour des voies d'exposition directes et indirectes (contaminations croisées dans la cuisine). Pour élaborer l'évaluation des risques de *Salmonella* dans les œufs et le poulet de chair, deux modèles distincts ont été créés, ayant en commun la caractérisation des dangers (modèle « dose-réponse »).

La troisième évaluation quantitative de risque concerne *Salmonella* dans la viande de porc développée par l'Agence des Laboratoires vétérinaires (VLA) au Royaume-Uni (Casey *et al.*, 2007). En 2002, les autorités du Royaume-Uni avaient pris comme objectif de réduire de 50 % la prévalence au niveau des abattoirs pour 2010 (Food Standards Agency, 2007). Hill et ses collaborateurs ont alors réalisé un modèle spécifique de la situation nationale en estimant le risque final pour le consommateur de développer une salmonellose suite à l'ingestion de viande de porc, de haché de porc ou de bacon. Cette évaluation quantitative de risque est désignée dans ce travail sous le terme de « modèle de Hill ». Le modèle d'évaluation du risque de la fourche à la fourchette est divisé en six modules distincts, dont chacun représente une partie de la chaîne de production. Les modules permettaient de déterminer la prévalence et la charge microbienne de la viande de porc et de produits de viande de porc dans les différentes étapes de la chaîne de production. La caractérisation des dangers est identique au modèle FAO/OMS concernant les œufs et les poulets de chair.

5.1. Identification du danger

L'identification du danger est une démarche qualitative qui implique de rassembler le maximum d'informations sur le danger (biologique, chimique ou physique) associée à la consommation d'une denrée alimentaire spécifique et sur les effets néfastes sur la santé du consommateur (Pedro et Boris, 2005). Dans cette synthèse, c'est la bactérie *Salmonella* dans les poulets de chair, les œufs et la viande de porc qui est étudiée à partir de diverses sources d'informations comme la littérature scientifique, les rapports officiels ou les ouvrages de référence.

Salmonella appartient à la famille des *Enterobacteriaceae* (Pedro et Boris, 2005 ; Euzéby, 2008). C'est essentiellement la nomenclature basée sur le système de sérotypage développé par Kauffman et White qui est utilisé pour le classement des salmonelles (International Commission on Microbiological Specifications for

Foods, 1996). On désigne directement les salmonelles par le nom du sérotype, par exemple *Salmonella* Typhimurium. *Salmonella* peut être isolée dans le tube digestif des animaux à sang chaud et à sang froid. Ces organismes contaminent et survivent dans les aliments et dans l'environnement. Leur taux de croissance est affecté par la température, le pH, la salinité du milieu, l'activité de l'eau, ainsi que la teneur en nutriments du milieu. Dans des conditions optimales de croissance, le temps de génération est d'environ 25 minutes. La température optimale est de 35-37 °C, mais plusieurs sérotypes peuvent croître entre 5 et 47°C (Gledel, 1996). Un contrôle efficace de la chaîne du froid dans les entreprises agro-alimentaires constitue un élément de maîtrise essentiel pour éviter une croissance de *Salmonella* dans les aliments. Le temps de génération varie considérablement en fonction de la température, de l'aliment ou de la matrice concernée. Le pH optimum se situe entre 6,5 et 7,5 mais des souches continuent à se développer à des valeurs de pH variant de 4,5 à 9,0. En dehors de cet intervalle, les salmonelles sont lentement tuées. Ces organismes croissent généralement bien en présence de 0,4 à 4 % en NaCl, mais peuvent résister à des concentrations de 20 % en sel durant des semaines. Cependant, les salmonelles sont sensibles à des traitements couramment utilisés pour préserver les aliments et sont tuées à des températures de cuisson de 70°C ou plus. Dans certains cas, même si l'activité de l'eau (a_w) est fortement réduite, à une valeur inférieure à 0,94, *Salmonella* peut survivre pendant une période d'un an ou plus dans certains aliments ou condiments comme le chocolat, le poivre noir ou la gélatine.

L'importance des symptômes provoqués par les salmonelles varie selon le sérotype impliqué dans la maladie. Chez l'homme, les premières manifestations apparaissent entre 12 et 36 heures après ingestion d'aliments contaminés: ce sont principalement des diarrhées, des vomissements, des douleurs abdominales, de la fièvre et, dans certains cas, se compliquant en une septicémie. La durée de la maladie est de 1 à 2 semaines. Près de 60 % des toxi-infections alimentaires (TIA) d'origine bactérienne, dont l'origine a pu être identifiée dans le monde, sont causées par des salmonelles (McCabe-Sellers et Beattie, 2004). Les infections à *Salmonella* sont la seconde cause de maladie zoonotique dans l'Union européenne, mais restent toujours un véritable problème de santé publique avec un taux d'incidence rapportée de 34,6 cas pour 100.000 habi-

tants en 2006. En Europe, le sérotype le plus fréquemment rencontré en 2006 était *Salmonella* Enteritidis avec 62,5 % des cas suivi de Typhimurium dans 12,9 % des cas. En Belgique et au Royaume-Uni, le taux d'incidence des salmonelloses en 2006 était respectivement de 34,3 et 23,3 cas par 100.000 habitants (European Food Security Authority, 2007 ; Scientific Institute of Public Health, 2007). Le nombre de salmonelloses n'a cessé de diminuer depuis plusieurs années en Belgique, au Royaume-Uni et dans l'Union européenne. L'implémentation des méthodes HACCP et des bonnes pratiques d'hygiène dans l'industrie, une meilleure surveillance des aliments par les autorités publiques, les campagnes de vaccination en production primaire de volaille sont des raisons parmi d'autres de la diminution des salmonelloses humaines.

5.1.1. *Salmonella* dans les œufs et le poulet de chair

Au cours des deux dernières décennies, *Salmonella* Enteritidis est devenue l'une des principales causes d'infection humaine, les œufs de poule étant l'une des sources majeures du pathogène (European Food Security Authority, 2007). Ce fait est attribué à la capacité spécifique de ce sérovar à coloniser le tissu ovarien des poules et à être présent dans le contenu des œufs entiers en coquilles. Les poulets de chair sont colonisés par des salmonelles durant leur croissance. La chair et la peau des carcasses sont fréquemment contaminées par *Salmonella* pendant l'abattage et la transformation.

La plupart des infections par *Salmonella* Enteritidis d'origine alimentaire ont été associées à des œufs en coquille ou des aliments contenant des œufs insuffisamment cuits (European Food Security Authority, 2007). Il y a deux voies de transmission de *Salmonella* aux œufs : par les ovaires infectés (transmission verticale) ou par la coquille suite à une contamination fécale (transmission horizontale). Elle comprend aussi la contamination par les vecteurs ambiants, comme les agriculteurs, les animaux de compagnie, les insectes et les rongeurs. La transmission verticale est considérée comme la voie principale de contamination par *Salmonella* et est plus difficile à maîtriser, tandis que la transmission horizontale peut être réduite de manière efficace par le nettoyage et la désinfection de l'environnement et par de bonnes pratiques d'hygiène (International Commission on Microbiological Specifications for Foods, 1996).

En Europe, *Salmonella* a été trouvée dans les œufs frais et les produits crus lors des étapes de transformation et de vente avec un taux de prévalence variant de 0 à 7,1 % selon le pays (European Food Security Authority, 2007). Au Royaume-Uni, une étude sur des œufs importés a estimé la prévalence égale à 3,3 % (Department for Environment Food and Rural Affairs, 2007 ; European Food Security Authority, 2007).

Concernant les poulets de chair, les pays membres de l'Union européenne ont rapporté en 2006 un nombre important d'échantillons positifs. A l'abattoir, la prévalence des échantillons variait de 0 à 15,1 % et au niveau de la transformation de 0 à 13,3 % (European Food Security Authority, 2007). Au Royaume-Uni, 3,6 % des échantillons des poulets vendus au détail étaient positifs pour *Salmonella* (Van Immerseel *et al.*, 2005 ; Department for Environment Food and Rural Affairs, 2007). En Belgique, le plan de surveillance officiel de 2006 concernant les abattoirs et le secteur de transformation du poulet a permis d'estimer la prévalence à 1,4 % pour les carcasses et 13,3 % pour la viande de découpe de poulet (Comité Scientifique de l'Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne alimentaire, 2005). En 2005, le sérotype le plus fréquemment isolé en Belgique chez les volailles était *Salmonella* Enteritidis avec 28,3 % des échantillons sérotypés (Centre d'Etude et de Recherches vétérinaires et agro-chimiques, 2006).

5.1.2. *Salmonella* et la filière porcine

Les porcs sont des hôtes de nombreux sérotypes de *Salmonella* (Pedro et Boris, 2005). Le réservoir principal est constitué par le tube digestif et les ganglions mésentériques. La contamination entre les différents hôtes peut se faire par voie féco-orale. La plupart du temps, les porcs sont des porteurs sains. La salmonellose clinique est relativement rare chez le porc et s'exprime essentiellement au post-sevrage par des diarrhées associées à de l'hyperthermie (Institut technique du porc, 2000). Dans la majorité des cas, la salmonellose porcine se rencontre dans des troupeaux où les conditions sanitaires et d'hygiène sont médiocres (Berends *et al.*, 1996). L'infection porcine a pour origine un animal porteur ou des aliments contaminés.

Les résultats de plans de surveillance des porcs en production primaire sont difficilement comparables puisque les échantillons analysés sont, soit des ganglions lymphatiques collectés à l'abattoir, soit

du sérum de porc ou soit des échantillons fécaux collectés au niveau de la ferme. En Belgique, l'analyse des échantillons de sérum prélevés sur des porcs provenant d'environ 7800 établissements a permis d'estimer la séroprévalence de *Salmonella* à 9,6 % en 2006.

En 1998, au Danemark et aux Pays-Bas, environ 15 % des cas de salmonelloses humaines ont été attribués à de la viande de porc contaminée (Lo Fo Wong *et al.*, 2002). Dans l'Union européenne, les niveaux de contamination de la viande de porc par *Salmonella* sont en constante diminution dans l'ensemble des pays. En 2006, les niveaux de contamination ont été jugés modérés. Les pays scandinaves rapportent des niveaux de contamination très faibles voire nuls (European Food Security Authority, 2007). En Belgique, les prévalences en 2006 en Belgique pour les carcasses (écouvillonnage sur une zone de 600 cm²), les viandes de découpe (25 g) et les viandes hachées (25 g) de porc étaient respectivement de 7,4, 2,1 et 2,6 % et sont en constante diminution depuis plusieurs années (Comité Scientifique de l'Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire, 2005). Au Royaume-Uni, *Salmonella* Typhimurium est le sérotype le plus fréquemment isolé chez le porc avec 66,2 % des échantillons positifs en 2006 et est également fréquemment isolé chez l'homme (Department for Environment Food and Rural Affairs, 2007 ; European Food Security Authority, 2007).

5.2. Caractérisation du danger

L'objectif est d'estimer la probabilité de maladie suite à l'ingestion d'une certaine quantité de salmonelles présentes sur les poulets de chair, les œufs et dans la viande de porc. Le modèle «dose-réponse» utilisé par la VLA au Royaume-Uni pour estimer le risque de maladie par *Salmonella* Typhimurium suite à l'ingestion de viande de porc contaminée était identique à celui développé par les experts du groupe de travail FAO/OMS pour l'analyse de risque de *Salmonella* Enteritidis dans les poulets de chair et les œufs.

L'établissement de la relation « dose-réponse » relève uniquement de la consommation des aliments par les consommateurs. La relation « dose-réponse » est déduite, dans une population bien caractérisée, en mesurant le nombre de cellules ingérées lors du repas (dose) et la probabilité d'être infecté (nombre d'individus malades divisé par le nombre d'individus ayant ingéré la dose). La

dose ingérée par le consommateur est la conséquence du processus industriel de production alimentaire qui précède, ce qui induit une incertitude sur la charge en bactéries. Les experts ajustent une relation à partir de données et extrapolent la relation sur l'ensemble des doses possibles. Les sources de données sont peu nombreuses pour obtenir des relations « doses-réponses » représentatives des différentes catégories de la population. L'idéal serait de disposer des résultats des enquêtes concernant des toxi-infections d'origine alimentaire collectives constatées sur des sujets sains lors de repas avec un plat unique dont on connaîtrait le niveau exact de contamination en germes.

Les données de foyers d'infections collectées par les experts de la FAO/OMS étaient issues d'études publiées ou non publiées. Les données concernaient 20 foyers d'infections (11 au Japon, 9 en Amérique du Nord) où l'information était suffisante quant au nombre de sujets exposés, au nombre de personnes devenues malades et le nombre de salmonelles par quantité de nourriture ingérée. De ces 20 foyers, 12 étaient associés à *Salmonella* Enteritidis, 3 à *Salmonella* Typhimurium et les 4 derniers avec des sérotypes moins fréquents. L'avantage de l'utilisation de telles données était que les doses ingérées par les individus étaient à des niveaux rencontrés dans la vie courante et non à des doses expérimentales. Cela permettait de donner un aperçu de la pathogénicité de *Salmonella* dans la population générale. Cependant, il existe une incertitude sur la manière dont ont été collectées les données, sur la dose ingérée, le nombre réel de personnes exposées et de malades. De plus, les données proviennent d'un petit nombre de pays développés et peuvent ne pas être applicables à d'autres régions. Enfin, la base de données ne contenait pas suffisamment d'informations pour réaliser une relation « dose-réponse » en fonction de différentes catégories de la population et spécialement pour les enfants, les femmes enceintes, les immunodéprimés et les personnes âgées. Les données épidémiologiques utilisées pour étudier la relation « dose-réponse » n'ont pas permis de conclure que *Salmonella* Enteritidis a une probabilité différente de causer une pathologie que d'autres sérovars. Pour l'utilisation de ces données, on a donc supposé qu'il n'existait pas de différence entre les sérovars et qu'il n'y a pas de différence de sensibilité entre les catégories de la population.

L'incertitude associée aux différentes

Tableau I : Probabilité de maladie par portion d'œuf reflétant différents niveaux de prévalence de troupeaux en production primaire et différents scénarii concernant le couple temps/température de stockage des œufs

Prévalence des troupeaux	Scénarii de temps/température de stockage		
	Réduit	Paramètres par défaut	Elevé
5 %	0.00002 %	0.00002 %	0.00004 %
25 %	0.00009 %	0.00012 %	0.00022 %
50 %	0.00017 %	0.00024 %	0.00045 %

variables du modèle est représentée sous la forme de distributions de probabilités. Ces distributions tiennent compte de la nature des données épidémiologiques. Un modèle « dose-réponse » de type bêta poisson a été adapté à ces données et repose sur trois principes: les bactéries ingérées par un sujet se comportent de manière indépendante, le nombre de bactéries ingérées par un sujet suit une loi de Poisson dont le paramètre est égal à la dose et la probabilité qu'une bactérie ingérée soit «activée» dans l'organisme suit une loi Bêta de paramètre α et β (Denis et Frits, 2005). Les paramètres α et β étaient issus du nombre de personnes effectivement malades et du nombre total de personnes ayant ingéré l'aliment contaminé. Le modèle «dose-réponse » de type bêta poisson est donné par la formule suivante :

$$P_{\text{maladie}} = 1 - \left[1 + \frac{\text{Dose}}{\beta} \right]^{-\alpha}$$

Afin d'appliquer la relation « dose-réponse » dans une évaluation quantitative de risque, l'approche idéale serait d'échantillonner au hasard dans les distributions de probabilités des variables entrant dans la relation « dose-réponse » afin de recréer une courbe « dose-réponse » tenant compte de l'incertitude. Comme alternative, il est également possible d'utiliser une approche plus déterministe où les percentiles 2.5 et le 97.5 représentent les marges d'incertitude dans la relation « dose-réponse ». La figure 4 donne la courbe « dose-réponse » réalisée pour l'analyse de risque de *Salmonella* Enteritidis dans les poulets de chair et les œufs sur base de données épidémiologiques de toxo infection d'origine alimentaire impliquant *Salmonella* (Food and Agriculture Organization/World Health Organization, 2006).

5.3. Evaluation de l'exposition et caractérisation du risque

5.3.1. *Salmonella* dans les œufs

Le modèle estimait la probabilité et le niveau de contamination par *Salmonella* d'une portion alimentaire d'œufs entiers en coquille contaminés, de repas à base d'œufs ou d'aliments contenant des œufs (par exemple, une pâtisserie) Ce modèle s'est attaché à certains aspects de la production d'œufs en exploitation, de la transformation ultérieure des œufs en produits dérivés, des pratiques de manipulation des détaillants et des consommateurs et de la préparation du repas à domicile. La figure 5 donne un schéma simplifié du modèle utilisé pour évaluer la contamination par *Salmonella* dans une filière de production d'œufs.

Le module de production estimait la probabilité de la présence d'un œuf contaminé par *Salmonella* Enteritidis, qui dépendait de la prévalence au niveau de la production primaire et de la fréquence avec laquelle les poules infectées pondaient des œufs contaminés. La prévalence parmi les troupeaux dépendait, en outre, des facteurs d'introduction de *Salmonella* Enteritidis dans les troupeaux

(par exemple, la prévalence pour les poulettes de remplacement, le transfert par l'environnement par des poules infectées antérieurement, la contamination des aliments pour volaille, etc.).

Le module de distribution et de stockage modélisait la croissance de *Salmonella* à partir de la ponte jusqu'à la préparation au domicile du consommateur. Grâce à la microbiologie prédictive, la croissance de *Salmonella* est déterminée en fonction de la durée et de la température de chaque étape. Deux modèles spécifiques à *Salmonella* Enteritidis ont été utilisés et comparés avec leurs spécificités notamment au niveau des paramètres d'entrées (United States department of Agriculture-Food Safety and Inspection Service, 1998 ; Paoli, informations non publiées).

Le module pour la transformation et la distribution des œufs en coquille et celui pour la préparation et la consommation conduisent à l'estimation de la distribution de probabilités de l'exposition humaine à différentes doses de *Salmonella* Enteritidis provenant d'œufs contaminés. La dose consommée dans un repas à base d'œuf dépend de la croissance de *Salmonella* Enteritidis entre le moment où l'œuf est pondu et celui où il est préparé, ainsi que des modes de préparation et de cuisson. La croissance de *Salmonella* Enteritidis dans les œufs contaminés est une fonction de la durée et de la température de stockage et est modélisée à l'aide de la microbiologie prédictive. Le résultat de l'évaluation de

Figure 4 : Probabilité de salmonellose suivant le nombre de cellules ingérées avec les percentiles 2.5 et le 97.5 représentant les fourchettes de l'incertitude dans la relation « dose-réponse »

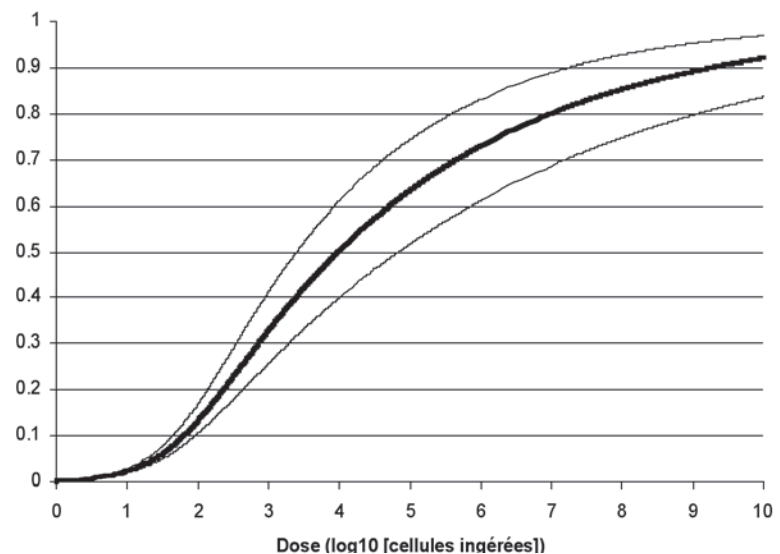
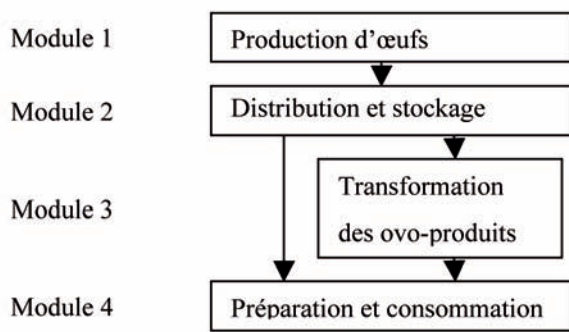


Figure 5 : Diagramme général des opérations de production des œufs et ovo-produits de la ferme jusqu'à la consommation



l'exposition, c'est-à-dire le nombre de cellules ingérées lors d'un repas, est introduit dans la relation « dose-réponse ».

Le traitement des œufs en ovoproduits implique le traitement de leurs contenus dans le but d'une utilisation alimentaire. Ce module nécessite la concentration en *Salmonella* Enteritidis dans le liquide cru des œufs et l'efficacité du processus de pasteurisation. Le résultat final de ce module est la concentration en bactéries après pasteurisation.

Le module de préparation et de consommation concerne les consommateurs finaux des œufs et des produits à base d'œufs. Le stockage, la préparation et l'efficacité de la cuisson sont pris en compte pour aboutir au final au nombre de bactéries par repas avant ingestion. Ce module considère également les différentes localisations où le repas peut être consommé comme le domicile ou le restaurant.

Les pays ont des durées et des températures de stockages différents. Pour étudier l'effet de la variabilité du couple temps-température, les paramètres par défaut ont été arbitrairement ajustés avec une diminution et une augmentation de 10 % et désignés respectivement comme scénarii de temps-température de stockage réduit et élevé.

Le risque de maladie humaine lié à *Salmonella* Enteritidis dans les œufs varie selon les différentes hypothèses adoptées dans le modèle. La réduction de la prévalence parmi les troupeaux au niveau de la production primaire entraînerait une réduction directement proportionnelle du risque pour la santé humaine. Par exemple, réduire la prévalence parmi les troupeaux de 50 % à 25 % permettrait de diviser par deux la probabilité moyenne de maladie par portion. Le tableau 1 donne les valeurs du risque de maladie par portion d'œuf consommée en fonc-

tion de la prévalence des troupeaux (5, 25 et 50 %) avec trois scénarii concernant la durée et la température de stockage (scénario standard, réduit, élevé) (Food and Agriculture Organization/World Health Organization, 2006).

Le risque le plus faible a été déterminé pour les troupeaux ayant une prévalence de 5 % et un couple temps-température de stockage réduit avec 2 salmonelloses par 10 millions de repas. A l'inverse, le risque le plus élevé a été calculé pour les troupeaux avec 50 % de prévalence et des conditions de stockage avec des durées et des températures élevées avec 45 salmonelloses toutes les 10 millions de portions. D'après ce modèle, les valeurs de risque de maladie sont proportionnelles à l'évolution de la prévalence du troupeau. Le risque doublerait approximativement lorsque les couples temps- température passent d'une situation standard à un scénario extrême.

Le risque de maladie humaine par portion semblerait insensible au nombre de *Salmonella* Enteritidis dans les œufs contaminés au moment de la ponte. Par exemple, le risque de maladie par portion resterait identique même si le nombre de *Salmonella* Enteritidis dans les œufs contaminés était au départ de 10 ou de 100. Cela s'expliquerait par la croissance de *Salmonella* Enteritidis dans les œufs, suite aux abus de températures lors des différentes étapes de production qui réduit l'effet du niveau de contamination initiale.

Différents scénarii ont été pris en compte comme, par exemple, l'effet d'un programme de test et de réorientation visant à réduire la prévalence parmi les troupeaux. Deux protocoles ont été retenus, comprenant un test (au début de la production d'œufs), ou trois tests (au début de la production d'œufs, quatre mois après et juste avant la dépopulation du

troupeau) appliqués à tous les troupeaux de producteurs d'œufs sur une période de quatre ans. Les tests appliqués trois fois par an pendant quatre ans réduiraient le risque de maladie humaine de plus de 90 %. Les tests appliqués une fois par an pendant quatre ans réduiraient le risque de plus de 70 %.

D'autres scénarii ont été évalués comme par exemple, les effets concernant la durée et la température de stockage. Les restrictions de la durée de conservation à moins de 14 jours réduiraient peu le risque de maladie par portion (moins de 1 %). Cependant, le maintien de la température de stockage chez le détaillant à moins de 7,7 °C réduirait le risque de maladie par portion d'environ 60 %. Si la durée de conservation était limitée à 7 jours, le risque par portion serait également réduit d'environ 60 %.

5.3.2. *Salmonella* dans les poulets de chair

Le modèle suivait la contamination des poulets de chair par *Salmonella* Enteritidis tout au long de la chaîne de production. L'ensemble de la filière de production n'a pas été entièrement modélisé vu le manque de données aux étapes de production primaire et à l'abattoir. De ce fait, le modèle commençait à la fin de l'étape d'abattage. L'objectif était de déterminer la probabilité et le niveau de contamination par *Salmonella* provenant de carcasses entières des poulets de chair cuits via une cuisine domestique pour consommation immédiate. Certains paramètres utilisés étaient considérés comme étant applicables pour décrire la situation dans différents pays. Par contre, d'autres paramètres étaient spécifiques à un pays, comme par exemple, la prévalence des carcasses contaminées par *Salmonella* à la fin de la transformation. La figure 6 donne un schéma de la voie suivie par les poulets de chair entre la production et la consommation (Food and Agriculture Organization/World Health Organization, 2006).

Le module appelé production des carcasses de volaille a pour but d'estimer la prévalence des poulets vivants contaminés par *Salmonella* au moment de quitter la ferme avant abattage et le nombre de salmonelles par volaille. Le module de transport et d'abattage décrit l'évolution de la contamination du départ de la ferme jusqu'à la sortie de l'abattoir. Une revue de la littérature concernant ces étapes n'a pas permis de récolter suffisamment de données pour permettre d'inclure ces deux modules dans le modèle. De plus

la concentration en salmonelles sur les poulets de chair est une donnée malaisée à obtenir car le dénombrement des salmonelles est difficile et coûteux. Dès lors, le modèle commence avec le niveau de contamination des carcasses de poulet à la fin de l'abattoir, c'est-à-dire à la fin du module 2 sur la figure 6.

L'objectif du module vente et stockage est d'estimer la variation du nombre de salmonelles sur les poulets de chair entre l'abattoir et la consommation par le consommateur en fonction des températures et des durées de chaque étape. Le modèle développé par Oscar (Oscar, 1999) a été sélectionné après une revue des différents modèles existants. Le modèle a été développé à partir de la viande de poulet et tient compte des interactions entre les bactéries et la matrice alimentaire. En outre, ce modèle était simple et facilement applicable. Les données concernant les durées et les températures des différentes étapes comme le stockage en magasin, les températures lors du transport ou encore du stockage à domicile sont difficiles à obtenir et des études complémentaires sont nécessaires pour une description complète de la chaîne du froid dans chaque pays.

Le module de préparation commence lorsque le poulet de chair est retiré du congélateur ou du réfrigérateur. Les poulets congelés subissent une étape de décongélation avant de suivre les mêmes étapes que les poulets réfrigérés. Ce module tient compte des contaminations croisées lors de la préparation dans la cuisine et d'une cuisson insuffisante du poulet. Les contaminations croisées tiennent compte des manipulations entre la viande crue, les mains et les autres aliments. La diminution du nombre de salmonelles pendant la cuisson est déterminée à l'aide de données décrivant la proportion d'organismes dans les zones de la carcasse protégées de la chaleur, la température d'exposition des bactéries protégées et la durée d'une telle exposition. Enfin, le but du module de consommation est de quantifier la fréquence de consommation du poulet de chair ainsi que la taille des portions.

Le nombre de *Salmonella* ingérées était alors calculé en fonction du poids de chair de volaille consommée par portion. L'exposition résultant à la fois d'une contamination croisée et d'un manque de cuisson de la volaille a été modélisée. Le risque de salmonellose via les deux modes d'exposition constituait les résultats finaux. Le tableau II donne le risque de contamination après ingestion d'une

Figure 6 : Diagramme général des opérations de production des poulets de chair de la ferme d'élevage jusqu'à la consommation

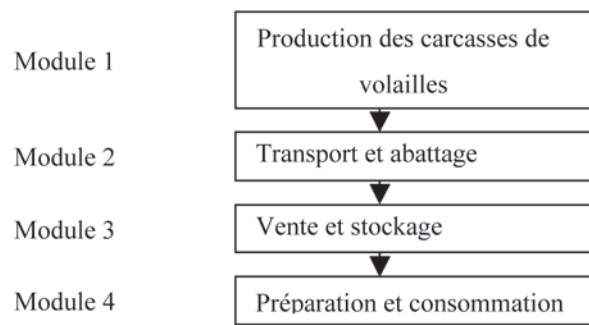


Tableau II : Calcul du nombre de salmonelloses par an pour 100.000 habitants avec une prévalence initiale des carcasses de poulet égale à 20 %

Prévalence de carcasses contaminées	20 %
Risque moyen de salmonellose par repas	0,0000113
Nombre de repas par an et par personnes	26
Risque annuel moyen de salmonellose	0,000294
Nombre annuel de salmonellose par 100.000 habitants	29,4

portion, en supposant 20 % de prévalence au niveau de l'abattoir.

L'interprétation du tableau 2 donne un risque moyen de 11,3 salmonelloses par million de portions. À l'échelle d'une population de 100.000 individus pour une période d'une année, le nombre de salmonelloses est égale 29,4 si le nombre de portions ingérées par an est égal à 26.

La réduction de la prévalence de poulets contaminés par *Salmonella* au niveau de l'abattoir est associée à une réduction du risque de maladie. Une relation de un à un a été estimée : une modification du pourcentage de la prévalence, dans la mesure où tous les autres paramètres restent constants, réduirait le risque d'un facteur analogue. Par exemple, une réduction de 50 % de la prévalence (de 20 % à 10 %) entraînerait une réduction de 50 % du risque de maladie par portion. De même, une forte réduction de la prévalence (de 20 % à 0,05 %) produirait une réduction de 99,75 % du risque de maladie. Une diminution de 40 % du nombre de salmonelles sur les poulets de chair sortant de réfrigération à la fin de la transformation réduirait le risque de maladie par portion d'environ 65 %.

Le modèle évalue les pratiques des manipulations à domicile et leurs conséquences. Une légère réduction de la fréquence et de l'ampleur d'une cuisson insuffisante résulterait d'une réduction marquée du risque de maladie par portion. Mais ce

résultat doit être relativisé par le fait que la contamination croisée pourrait être une source prédominante de risque de maladie. Toutefois la contamination croisée dans le foyer reste un phénomène très incertain vu le manque de données disponibles sur cet aspect du modèle.

5.3.3. *Salmonella* dans la viande de porc

Le modèle de *Salmonella* dans la viande de porc a été décomposé en 5 modules: la ferme, le transport et l'attente avant abattage, l'abattage et la découpe, la distribution et le stockage, la préparation et la consommation. Le résultat final du modèle est la probabilité d'exposition à *Salmonella* Typhimurium et le nombre de salmonelles lors de la consommation d'une portion de viande de porc au Royaume-Uni (Casey *et al.*, 2007). La figure 7 donne le schéma de la voie suivie par la production de la viande de porc de la ferme jusqu'à la préparation au domicile du consommateur.

Au départ, le modèle avait pour but de déterminer le nombre de cas de salmonellose liés à l'ingestion de viande de porc préparée à domicile ou à l'extérieur (collectivité, restaurant). Cependant, le manque de données a rendu impossible le développement d'un module estimant la contamination à l'extérieur du domicile et le modèle a été construit en fonction des données disponibles. Beaucoup de carences et de lacunes dans les données

ont été identifiées. Des extrapolations à partir de données existantes et des avis d'experts ont été nécessaires à tous les niveaux du modèle.

Le module d'élevage a pour but de donner la prévalence de porcs infectés à la sortie de la ferme d'engraissement juste avant le transport vers l'abattoir. Ce module simule la dynamique de transmission de la contamination par *Salmonella* des porcs excréteurs, porteurs et susceptibles au sein d'une même loge et entre les loges dans la ferme d'élevage.

Le module de transport et d'attente simule l'augmentation du nombre de porcs excréteurs dû au stress pendant le transport et le nombre de porcs infectés lors de l'attente à l'abattoir.

Le module abattoir et découpe considère deux types d'abattoirs au Royaume-Uni. La variation de la concentration et de la prévalence est simulée aux différentes étapes de l'abattoir et de transformation. Le modèle de microbiologie prédictive développé par Oscar (Oscar, 1999) a été utilisé pour simuler l'effet de la température et de la durée des différentes étapes après l'abattoir sur la concentration en salmonelles. Le résultat final de ce module est la prévalence et le niveau de contamination des produits de viande de porc (viande de découpe, viande hachée et bacon) réfrigérés ou congelés.

Le module de distribution et de stockage décrit l'évolution du nombre de *Salmonella* par microbiologie prédictive. Comme précédemment, c'est le modèle développé par Oscar qui a été utilisé.

Le module préparation et consommation considère les viandes de découpe, la viande hachée et le bacon réfrigérés et congelés. Le modèle simule deux voies d'exposition : une cuisson insuffisante de la viande et une contamination croisée avec d'autres aliments. Pour chaque produit, la voie d'exposition, les probabilités d'exposition et de dose ingérée ont été estimées.

Le modèle estime à 1687 cas par an de salmonelloses au Royaume-Uni attribuables à des produits de porc. Cela représente approximativement 30 % des 6200 cas rapportés par an en 2001. Malheureusement le nombre de cas de salmonelloses estimées par le modèle reste problématique à cause du manque de données, particulièrement concernant le nombre de repas pris par semaine et par personne. Cette dernière donnée a été estimée à partir de l'opinion des experts travaillant sur le projet et devrait être idéalement remplacée par des données issues

d'une enquête. Le tableau 3 donne le nombre de cas par an de salmonelloses suite à la consommation de produits de porc au Royaume-Uni suivant la voie d'exposition.

Les résultats donnent un risque décroissant pour la viande de porc avec 984 cas par an, la viande hachée avec 701 cas par an et le bacon avec 2 cas par an. Intuitivement, le risque semble plus élevé pour la viande hachée par rapport à la viande de découpe puisque la viande hachée a des niveaux de prévalence plus élevés et que les salmonelles sont dispersées dans l'ensemble de la portion et donc avec un risque plus élevé lié à une cuisson insuffisante au cœur de la portion. Cependant la taille des portions de viande de découpe était trois fois celle des viandes hachées.

Concernant les pratiques à domicile, le risque moyen le plus élevé de maladie a été observé via les contaminations croisées (soit 935 cas au Royaume-Uni), alors que le manque de cuisson est beaucoup moins fréquent que les contaminations croisées, avec 752 cas au Royaume-Uni. Ces résultats peuvent servir aux autorités pour orienter les campagnes de sensibilisation auprès du grand public en vue d'améliorer l'hygiène dans les cuisines et diminuer le nombre de cas de salmonelloses humaines.

Les scénarios ont été utilisés pour mettre en évidence le meilleur moyen de contrôler le nombre de salmonelloses par an. La réduction de la prévalence dans les troupeaux de porcs à la ferme à l'âge de l'abattage serait une mesure efficace pour réduire le risque de salmonellose humaine. Pour les produits de viande hachée et de bacon, la réduction de la prévalence au sein de troupeaux de 25 %, 50 % et 75 % conduit respectivement à une diminution de 25 %, 50 % et 75 % du risque de maladie. Cependant, le résultat est différent pour la viande de découpe

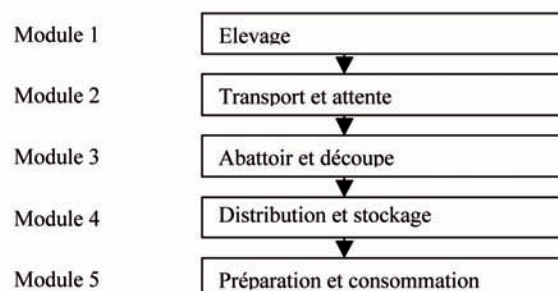
de porc, étant donné que la réduction de la prévalence au sein de troupeaux de 25 % conduit à une diminution du risque de maladie d'environ 43 % pour les contaminations croisées, et 50 % pour une cuisson insuffisante. Grâce à ces résultats, des stratégies de contrôle ont pu être ciblées sur les fermes d'engraissement de porcs. Mais le modèle n'a pas été développé pour déterminer comment diminuer la prévalence au niveau des troupeaux et pour évaluer la faisabilité de cette mesure de maîtrise.

Remarquons encore que, malheureusement, beaucoup de données étaient manquantes à tous les niveaux du modèle. Des hypothèses et des opinions d'experts ont été utilisées pour pallier au manque de données. Ces données devraient être idéalement remplacées par des données provenant d'études validées. Le module préparation et consommation était affecté par le manque de données. Par exemple, le modèle simule la croissance de *Salmonella* à partir d'un modèle de microbiologie prédictive développé pour le poulet de chair car aucun modèle n'a été développé pour la viande de porc. De même, les données sur la préparation et la cuisson des produits de porc étaient limitées. Les données concernant le manque de cuisson et les données de contamination croisée via les mains et les équipements sont difficiles à collecter vu le grand nombre de pratiques différentes. La fréquence de consommation de la viande de porc est également une donnée manquante importante sans laquelle le nombre de cas humains de salmonelloses ne pouvait être estimé avec précision.

6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'analyse de risque a été instituée suite aux accords internationaux et implantée pour un usage systématique en vue d'une aide à la gestion du risque alimentaire.

Figure 7 : Diagramme général des opérations de production des viande de porc à partir de la ferme d'élevage jusqu'à la consommation au Royaume-Uni



Cette discipline acquiert peu à peu ses lettres de noblesses suite aux différentes publications et études réalisées ces dernières années. Le but est une maîtrise de la chaîne alimentaire en vue d'une meilleure protection du consommateur. À l'avenir, cette discipline est appelée à prendre de plus en plus d'importance pour la prise de décision. Pour mener à bien une évaluation quantitative de risque complète de la chaîne alimentaire, la maîtrise de l'ensemble des techniques lié à cette discipline est indispensable.

Les trois exemples d'évaluation quantitative de risque étudiés dans cet article ont permis d'émettre des recommandations de gestion principalement au niveau de la production primaire. La diminution de la prévalence, quelle que soit la matrice étudiée, entraînerait une diminution de risque de maladie pour le consommateur. Cependant, ces résultats sont à nuancer car, à l'heure actuelle, l'application de l'évaluation quantitative de risque à l'industrie de la viande s'est heurtée à un problème récurrent de manque de données à certaines étapes clés. Les Etats et les entreprises doivent entreprendre des études complémentaires et offrir ainsi une meilleure évaluation de la situation de la chaîne alimentaire « de la fourche à la fourchette ».

Pour mener à bien une évaluation quantitative de risque, il est recommandé de réaliser au préalable une étude sur les sources de données nécessaires et leur disponibilité. Certaines évaluations quantitatives de risque ne sont pas encore réalisables faute de données suffisantes pour la construction d'un modèle complet. Dans certains cas, on aura alors recours à une évaluation de risque de type qualitative, semi quantitative ou quantitative déterministe nécessitant moins de données. Enfin, il est nécessaire de bien clarifier les objectifs. Si une réponse est demandée rapidement ou que les ressources et les données sont insuffisantes, alors une évaluation quantitative de risque probabiliste n'est peut-être pas la bonne solution. Afin de pallier le manque de données,

des alternatives existent comme les opinions d'experts ou les assumptions. Ces méthodes peuvent apporter des réponses rapides en cas de difficultés pour la construction du modèle. Mais elles sont à employer avec précaution et doivent être utilisées en dernier recours lorsqu'il n'existe aucune étude sur le sujet.

L'analyse de risque est encore une approche scientifique récente qui a encore besoin de normalisation et d'affirmer ses méthodes et ses principes. La représentation d'un système physique au travers d'équation est certainement une avancée considérable dans la maîtrise de la chaîne alimentaire. C'est aussi un excellent outil d'organisation de la connaissance et d'aide à la compréhension du phénomène de santé étudié. Selon la disponibilité des données, une ou plusieurs étapes de la filière de production peuvent être intégrées dans le modèle. Les déficiences cruciales en données sont ainsi identifiées, ce qui permet de mieux cibler les travaux futurs. C'est aussi un formidable outil permettant de choisir des options de gestion les plus appropriées.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé grâce au soutien financier du programme de recherche du SPF Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement (R-04/003-Metzoen) « Développement d'une méthodologie pour une évaluation quantitative de risque alimentaire en Belgique appliqué au modèle *Salmonella* chez le porc ». Les partenaires de ce programme sont l'Université de Hasselt (UHasselt), l'Université de Liège (ULg), l'Université de Gand (UGent), l'Institut voor Landbouw en Visserijonderzoek (ILVO), le Centre d'Etude et de Recherches Vétérinaires et Agrochimiques (CERVA) et l'Institut de Santé Publique (ISP). Nous remercions également les agents de l'Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire (AFSCA) pour leur aide et leurs conseils.

Quantitative microbial risk assessment: review of three models about *Salmonella* in foodstuffs

SUMMARY

Following international agreements and European legislation, risk analysis has become a systematic approach to control the food chain safety. The microbial risks in the food chain and their consequences for public health can be assessed and managed more effectively. This paper gives a general description of the risk analysis principles based on the *Codex Alimentarius* commission. This work highlights the advantages and disadvantages of risk analysis and also treats the problems to achieve a complete "farm to fork" model. *Salmonella* in different food types is taken as an example to illustrate quantitative risk assessment. Two models concerning eggs and broiler chickens developed by the World Health Organization/Food and Agriculture Organization consortium and a third model concerning pigs developed by the Veterinary Laboratories Agency of the United Kingdom are described. An analysis of the methods used for the construction of these two models is also presented. The interest of these three models is that they also include risk management options to limit the spread of food-borne infections. They also describe the final risk for a population following consumption of foodstuffs. These models are valuable tools for health officials but also for feed industry.

Tableau III : Calcul du nombre de salmonelloses par an au Royaume Uni suivant le type de viande et le type de contamination lors de la préparation au domicile

Type de produits	Nombre moyen de salmonelloses par an		Total
	Cuisson insuffisante	Contamination croisée	
Viande de découpe	418	566	984
Produits de viande hachée	334	367	701
Bacon	0	2	2
Total	752	935	1687

REFERENCES

- AHL A.S., ACREE J.A., GIPSON P.S., MC DOWELL R.M., MILLER L., MCELVAINE M.D. Standardization of nomenclature for animal health risk analysis. *Rev. Sci. Tech.*, 1993, **12**, 1045-1053.
- BERENDS B.R., URLINGS H.A., SNIJDERS J.M., VAN KNAPEN F. Identification and quantification of risk factors in animal management and transport regarding *Salmonella* spp. in pigs. *Int. J. Food Microbiol.*, 1996, **30**, 37-53.
- BOLLAERTS K., MESSENS W., DELHALLE L., AERTS M., DEWULF J., DEBUSSER E., BOONE I., GRIJSPEERDT K. Development of a modular quantitative microbial risk assessment to evaluate zoonotic risks in Belgium: Salmonellosis through consumption of pork as an example. In : *Agrostat2008*, 10th European Symposium on Statistical Methods for the Food Industry, Louvain-la-Neuve, 23-25 January 2008.
- CASEY P.G., GARDINER G.E., CASEY G., BRADSHAW B., LAWLOR P.G., LYNCH P.B., LEONARD F.C., STANTON C., ROSS R.P., FITZGERALD G.F., HILL C. A five-strain probiotic combination reduces pathogen shedding and alleviates disease signs in pigs challenged with *Salmonella enterica* Serovar Typhimurium. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2007, **73**, 1858-1863.
- CENTRE D'ETUDE ET DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES ET AGRO-CHIMIQUES *Salmonella* Serotypes analysed at the CODA-CERVA in 2005 evolution among poultry, cattle and pig isolates from 1992 to 2005 with results of antimicrobial resistance testing. Centre d'Etude et de Recherches vétérinaires et agro-chimiques : Bruxelles, 2006, 40 p.
- CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION Principles and guidelines for the conduct of microbiological risk assessment. (1999) [en ligne] Adresse URL : www.codexalimentarius.net/download/standards/357/CXG_030e.pdf Consulté le 1/10/2008
- CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION Principles et directives pour la gestion des risques microbiologiques. Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization : Geneva, 2007, 12 p.
- CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION Principes de travail pour l'analyse des risques en matière de sécurité sanitaire des aliments destinés à être appliqués par les gouvernements. Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization : Geneva, 2007, 5 p.
- COMITÉ SCIENTIFIQUE DE L'AGENCE FÉDÉRALE POUR LA SÉCURITÉ DE LA CHAÎNE ALIMENTAIRE Terminologie en matière d'analyse des dangers et des risques selon le codex alimentarius. Agence fédérale pour la Sécurité de la Chaîne alimentaire : Bruxelles, 2005, 46 p.
- COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES Livre Blanc sur la sécurité alimentaire. Commission des Communautés européennes : Bruxelles, 2000, 61 p.
- COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES Regulation (EC) n° 178/2002 of the European Parliament and of the Council of 28 January 2002 laying down the general principles and requirements of food law, establishing the European Food Safety Authority and laying down procedures in matters of food safety. *Off. J. Eur. Union*, 2002, L31/24-31.
- COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES. Commission regulation (EC) n° 2073/2005 of 15 November 2005 on microbiological criteria for foodstuffs. *Off. J. Eur. Union*, 2005, 338/331-338/326.
- COVELLO V.T., MERKHOFFER M.W. Risk assessment methods: approaches for assessing health and environmental risks. Plenum Press : New York, 1993, 318 p.
- DELHALLE L., BOLLAERTS K., MESSENS W., GRIJSPEERDT K., VAN DER STEDE Y., DEWULF J., MAES D., MINTIENS K., DAUBE G. Assessing interventions to reduce the risk of human salmonellosis from fresh pork meat in Belgium. In : *Proceedings of the first Belgian symposium on Salmonella research and control in pigs*, Gent, 23th May 2008, 2008.
- DENIS J.B., FRITS M. Notions de base utiles en modélisation stochastique de phénomènes complexes. Institut national de la Recherche agronomique : Jouy-en-Josas, 2008, 58 p.
- DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS (UK) Zoonoses report United Kingdom 2006. (2007) [en ligne] Adresse URL : http://www.defra.gov.uk/animalh/diseases/zoonoses/zoonoses_reports/zoonoses2006.pdf consulté le 1/10/2008
- EUROPEAN FOOD SECURITY AUTHORITY The Community summary report on trends and sources of zoonoses, zoonotic agents, antimicrobial resistance and foodborne outbreaks in the European Union in 2006. (2007) [en ligne] Adresse URL : http://www.efsa.europa.eu/cs/BlobServer/DocumentSet/Zoon_report_2006_en.0.pdf?ssbinary=true consulté le 1/10/2008
- EUZEBY J.P. Dictionnaire de bactériologie vétérinaire. (2008) [en ligne] Adresse URL : <http://www.bacterio.cict.fr/bacdico/garde.html> consulté le 1/12/2008.
- FEINBERG M., BERTAIL P., TRESSOU J., VERGER P. Analyse de risque alimentaire. Tec & Doc Lavoisier : Paris, 2006, 418 p.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION/WORLD HEALTH ORGANIZATION Comprendre le Codex alimentarius. 3^e édition. Lavoisier : Paris, 2006, 48 p.
- FOOD STANDARDS AGENCY Strategic plan to 2010: putting consumers first. (2007) [en ligne] Adresse URL : <http://www.food.gov.uk/multimedia/pdfs/strategicplan2010e.pdf> consulté le 1/10/2008.
- GLEDEL J. Le genre *Salmonella*. In : Bourgeois C.M., Mesle J.F., Zucca J., Microbiologie alimentaire. Tome 1 : aspect microbiologique de la

- sécurité et de la qualité des aliments. 2^e édition. Lavoisier: Paris, 1996, 62-79.
- GRIJSPEERDT K., MESSENS W., HERMAN L. Quantitative risk assessment of *Salmonella* Enteritidis in shell eggs in Belgium. In : World's Poultry Science Association, 11th European Symposium on the quality of eggs: Doorwerth, 23-26 may 2005, 2005, http://www.wpsa.info/docs/013024_01_12.pdf
- HOORNSTRA E., NORTHOLT M.D., NOTERMANS S., BARENDSSZ A.W. The use of quantitative risk assessment in HACCP. *Food Control*, 2001, **12**, 229-234.
- HOORNSTRA E., NOTERMANS S. Quantitative microbiological risk assessment. *Int. J. Food Microbiol.*, 2001, **66**, 21-29.
- INSTITUT TECHNIQUE DU PORC Mémento de l'éleveur de porc. Institut technique du Porc : Paris, 2000, 374 p.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON MICROBIOLOGICAL SPECIFICATIONS FOR FOODS Microorganism in foods : characteristics of microbial pathogens. International Commission on Microbiological Specifications for Foods (ICMSF) : London, 1996, 513 p.
- LO FO WONG D.M., HALD T., VAN DER WOLF P.J., SWANENBURG M. Epidemiology and control measures for *Salmonella* in pigs and pork. *Livest. Prod. Sci.*, 2002, **76**, 215-222.
- MCCABE-SELLERS B.J., BEATTIE S.E. Food safety: emerging trends in foodborne illness surveillance and prevention. *J. Am. Diet. Assoc.*, 2004, **104**, 1708-1717.
- MOLL M., MOLL N. Précis des risques alimentaires. Tec et doc Editions : Paris, 2000, 384 p.
- MOLL M., MOLL N. Sécurité alimentaire du consommateur. Tec et doc Editions: Paris, 2002, 442 p.
- NAUTA M.J. A modular process risk model structure for quantitative microbiological risk assessment and its application in an exposure assessment of *Bacillus cereus* in a REPFED. National Institute of Public Health and the Environment : Bilthoven, 2001, 96 p.
- ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ Application de l'analyse des risques dans le domaine des normes alimentaires. World Health Organization : Genève, 1995, 39 p.
- ORGANISATION MONDIALE DU COMMERCE Accord sur l'application des mesures sanitaires et phytosanitaires (article I-11). Organisation mondiale du Commerce : Genève, 1994, 77-100.
- OSCAR T.P. Response surface models for effects of temperature and previous temperature on lag time and specific growth rate of *Salmonella* Typhimurium on cooked ground chicken breast. *J. Food Prot.*, 1999, **62**, 1111-1114.
- PALISADE @Risk advanced risk analysis for spreadsheet. Palisade : New York, 2004, 503 p.
- PEDRO A., BORIS S. Zoonoses and communicable diseases to man and animals. World Health Organization : Geneva, 2005, 382 p.
- POUILLOT R., SANAA M., DUFOUR B. Principes de l'appréciation quantitative probabiliste des risques. *Epidemiol. Santé Anim.*, 2002, **41**, 95-112.
- ROGY C. Contexte de l'utilisation de l'analyse de risque : national, communautaire, international. *Epidemiol. Santé Anim.*, 2002, **41**, 19-25.
- SAEGERMAN C. Concepts généraux de l'analyse de risque liée à la chaîne alimentaire. Département des maladies infectieuses et parasitaires. Université de Liège : Liège, 2005, 48 p.
- SAEGERMAN C., BERKVENS D. Introduction. In : Agence fédérale pour la sécurité de la chaîne alimentaire, Application de l'évaluation de risque dans la chaîne alimentaire. Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire : Bruxelles, 2007, 7-13.
- SCHLUNDT J. L'évaluation du risque comme outil de gestion de risque : le cas des contaminants microbiens. In : Hanak E., Boutrif E., Fabre P., Pineiro M., Gestion de la sécurité des aliments dans les pays en développement. Actes de l'atelier international, CIRAD-FAO, 11-13 décembre 2000, Montpellier, France. Centre de Coopération internationale en Recherche agronomique pour le Développement (CIRAD) : Paris, 2002, Adresse URL : <http://www.cirad.fr/colloque/fao/pdf/5-schlundt-vf.pdf> consulté le 1/10/2008.
- SCIENTIFIC INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH Annual report on human *Salmonella* and *Shigella* in Belgium 2006 National Reference Center for *Salmonella* and *Shigella*. Scientific Institute of Public Health : Brussels, 2007, 38 p.
- THRUSFIELD M. Veterinary epidemiology. 3rd edition. Blackwell Publishers : Oxford, 2007, 610 p.
- TOMA B., BÉNET J.J., DUFOUR B., ELOIT M., MOUTOU F., SANAA M. Glossaire d'épidémiologie animale. Editions du Point Vétérinaire : Maisons-Alfort, 1991, 365 p.
- UNITED STATES DEPARTEMENT OF AGRICULTURE-FOOD SAFETY AND INSPECTION SERVICE *Salmonella* Enteritidis risk assessment : shell eggs and egg products. Food Safety and Inspection Service : Washington, 1998, 286 p.
- UYTTENDAELE M., BAERT K., GHAFIR Y., DAUBE G., DE ZUTTER L., HERMAN L., DIERICK K., PIERARD D., DUBOIS J.J., HORION B., DEBEVERE J. Quantitative risk assessment of *Campylobacter* spp. in poultry based meat preparations as one of the factors to support the development of risk-based microbiological criteria in Belgium. *Int. J. Food Microbiol.*, 2006, **111**, 149-163.
- VAN IMMERSEEL F., DE BUCK J., BOYEN F., PASMANS F., BERTRAND S., COLLARD J.M., SAEGERMAN C., HOOYBERGHS J., HAESBROUCK F., DUCATILLE R. *Salmonella* dans la viande de volaille et dans les œufs : un danger pour le consommateur qui demande la mise en place d'un programme de lutte efficace. *Ann. Med. Vet.*, 2005, **149**, 34-48.
- VOSE D. Risk analysis : a quantitative guide. 2^d edition. John Wiley & Sons : Chichester, 2000, 418 p.
- ZWIETERIN M.H., VAN GERWEN S.J. Sensitivity analysis in quantitative microbial risk assessment. *Int. J. Food Microbiol.*, 2000, **58**, 213-221.