



Le directeur général

Maisons-Alfort, le 19 février 2014

AVIS

de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

relatif à « la sécurité et la salubrité microbiologique des carcasses de porcs réfrigérées en chambre froide puis transportées en camion frigorifique »

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont rendus publics.

L'Anses a été saisie le 3 janvier 2013 par la Direction Générale de l'Alimentation (DGAL) pour la réalisation de l'expertise suivante : « Demande d'avis relatif à la sécurité et la salubrité microbiologique des carcasses de porcs réfrigérées en chambre froide puis transportées en camion frigorifique ».

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

Le règlement (CE) n°853/2004 stipule que les viandes doivent atteindre (et conserver) une température inférieure à 7°C en tout point de la carcasse avant le transport.

L'arrêté du 18 décembre 2009 (relatif aux règles sanitaires applicables aux produits d'origine animale et aux denrées alimentaires en contenant), conformément au règlement (CE) n° 853/2004 et à titre dérogatoire prévu par celui-ci, précise que le transport et la découpe des carcasses d'ongulés domestiques peuvent être effectués en cours de refroidissement sous réserve du respect de certaines conditions : la température, en tout point de la carcasse, doit notamment être inférieure à 12°C au départ de l'abattoir et la durée de transport doit être inférieure à 2 heures.

En 2008, le Syndicat National du Commerce du Porc (SNCP) s'appuyant sur un rapport d'étude de l'interprofession proposait d'assouplir ces critères de dérogation. Il souhaitait d'une part augmenter la température maximale autorisée de 12°C à 15°C en tout point pour les carcasses de porcs en sortie d'abattoir et d'autre part ne pas limiter la durée de transport entre l'abattoir et l'atelier de découpe. La DGAL avait alors saisi l'Afssa sur la demande de modification demandée par le SNCP (saisine n°2008-SA-0283).

Le 18 février 2009, l'Afssa rendait son avis relatif au transport de carcasses de porcs n'ayant pas atteint la température réglementaire à la sortie de l'abattoir. Cet avis précisait l'impossibilité de se

prononcer sur la pertinence de l'utilisation du transport frigorifique comme moyen de refroidissement des carcasses dans les conditions expérimentales suivies et recommandait la réalisation d'une nouvelle étude.

Au vu des nouveaux éléments présentés dans l'étude de l'IFIP de mars 2011, l'Anses est saisie des questions suivantes :

1. L'étude du pétitionnaire est-elle pertinente, tant sur le protocole utilisé que sur les critères microbiologiques retenus ?
2. Les conclusions de l'étude sont-elles valides ?
3. Quelle serait la température maximale acceptable (c'est-à-dire n'augmentant pas de manière significative le risque pour le consommateur vis-à-vis des germes pathogènes étudiés) de sortie des carcasses d'abattoir, dans la limite d'un temps de transport de deux heures ?
4. Si possible sur la base d'un couple temps/température, quelles pourraient être les valeurs maximales acceptables concernant la durée et la température de transport des carcasses de porcs ?

En cas de confirmation par l'Anses des conclusions de l'IFIP, la France proposera à la Commission Européenne une modification de la réglementation européenne.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

L'expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Evaluation des risques biologiques liés aux aliments ». L'Anses a confié l'expertise à des rapporteurs externes et internes au CES et à l'unité « Méthodologie et études en microbiologie et santé animale ».

Après consultation du CES « Evaluation des risques biologiques liés aux aliments », réuni le 26 mars 2013, l'Anses a effectué une demande de compléments d'informations auprès de la DGAL, le 25 avril 2013. Le 29 octobre 2013, l'Anses a reçu l'ensemble des éléments demandés pour poursuivre l'expertise.

Les travaux ont été présentés au CES « Evaluation des risques biologiques liés aux aliments » tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques entre le 26 mars 2013 et le 26 novembre 2013. Ils ont été adoptés par le CES « Evaluation des risques biologiques liés aux aliments » réuni le 14 janvier 2014.

Dans un premier temps, l'étude de l'IFIP d'octobre 2013 est présentée, puis sa pertinence est discutée (réponse à la première question de la saisine). L'Anses propose ensuite une méthodologie de modélisation des cinétiques de refroidissement des carcasses, ainsi qu'une nouvelle évaluation de scénarios. Enfin des éléments de réponses sont apportés pour les questions 2, 3 et 4 de la saisine.

En plus du dossier technique, les sources de données exploitées sont citées à la fin du rapport.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise. Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES

3.1. Présentation de l'étude de l'IFIP (octobre 2013)

3.1.1. Méthodologie de l'étude de l'IFIP

Les objectifs de l'étude de l'IFIP étaient les suivants :

- Estimer l'écart d'accroissement bactérien induit par le transport frigorifique des carcasses de porcs chargées à une température supérieure à 7°C à cœur, comparativement à ces mêmes carcasses qui seraient restées en chambre froide;
- Evaluer l'impact microbiologique du transport frigorifique pour des scénarios prédéfinis, en termes de température des carcasses au chargement et de durée de transport.

Pour cela, la méthodologie employée par l'IFIP est la suivante :

- Acquérir des cinétiques de température de carcasses de porcs en chambres froides et en camions frigorifiques. Des mesures de températures de carcasses, chargées à des températures supérieures à 7°C à cœur, ont été réalisées à cœur et en surface entre 2006 et 2010 pour cinq entreprises différentes. Quarante-deux cinétiques en chambres froides et 141 cinétiques en camions frigorifiques ont été réalisées.
- Reconstituer, à partir des cinétiques en chambres froides et des cinétiques en camions frigorifiques, des cinétiques complètes de température des carcasses entre l'entrée en chambre froide et la fin du transport frigorifique. Chaque cinétique obtenue pour le jambon en chambre froide a été associée avec toutes les cinétiques obtenues pour les jambons de la même entreprise pendant les transports. Pour être conformes, ces reconstitutions devaient répondre à certains critères (par exemple la différence de température entre la sortie de la chambre froide et l'entrée en camion frigorifique devait être inférieure à deux degrés Celsius). Après vérification de la satisfaction des critères pour chaque association, 908 cinétiques reconstituées ont été conservées.
- Simuler le comportement microbien en surface des carcasses (côté viande et côté couenne) pour les cinétiques obtenues en chambres froides et celles reconstituées. Cette démarche utilise l'intégration temps/température. Les potentiels de croissance théoriques de quatre microorganismes (*Salmonella*, *E. coli*, *Listeria monocytogenes* et *Pseudomonas*) sont calculés à partir de modèles de microbiologie prévisionnelle en fonction des cinétiques de température mesurées à la surface de carcasses. Les simulations sont réalisées selon une approche sécuritaire : le temps de latence est nul, les valeurs de pH et Aw des carcasses sont constantes. Différentes sources de variabilité sont prises en compte : la variabilité des cinétiques de refroidissement, la variabilité microbiologique (notamment la variabilité entre souches pour une même espèce), la variabilité de pH des différentes carcasses. Les valeurs des paramètres utilisés pour la simulation probabiliste sont fournies et justifiées par des éléments de bibliographie disponibles. Dix mille simulations ont été réalisées pour chacun des quatre microorganismes étudiés par des tirages au sort des valeurs utilisées au sein des distributions présentées.
- Comparer les accroissements microbiens en surface des carcasses chargées à une température supérieure à 7°C à cœur (scénarios alternatifs) par rapport à des carcasses maintenues en chambre froide ou à des carcasses chargées à 12°C puis transportées pendant 2h (scénarios de référence).

De plus, suite à la demande de compléments d'informations de l'Anses en avril 2013, le SNIV-SNCP a caractérisé les pratiques actuelles de transport des carcasses de porc. Des contrôles de températures des carcasses, à cœur du jambon et en surface de la poitrine, ont été réalisés lors

de leur chargement (dans 24 abattoirs, 9 carcasses par camions : 3 à l'arrière, 3 au milieu et 3 à l'avant) et de leur déchargement. Concernant le chargement, 886 camions ont été contrôlés et les températures d'environ 6000 carcasses ont été mesurées du 13 mai 2013 au 19 juin 2013. Concernant le déchargement, 407 camions ont été contrôlés et les températures de plus de 3000 carcasses ont été mesurées.

3.1.2. Résultats et conclusions de l'étude de l'IFIP

Deux stratégies différentes sont utilisées pour comparer les accroissements microbiens. Dans un premier temps, la croissance bactérienne en surface des carcasses chargées à une température supérieure à 7°C à cœur (toutes températures confondues ; entre 9,8°C et 29,1°C) puis transportées est comparée avec celle des carcasses maintenues en chambre froide (le temps est équivalent pour les deux catégories de carcasses, transportées ou non). Dans un second temps, la croissance bactérienne en surface des carcasses qui sortent de l'abattoir dès que la température à cœur est de 12°C, 15°C, au maximum 15°C, ou 18°C pour une durée de transport illimitée (maximum 40h) est comparée à celle des carcasses sortant de l'abattoir dès que la température à cœur est de 12°C, pour une durée de transport de 2 h (Arrêté du 18 décembre 2009 concernant la découpe à chaud).

- Comparaison des accroissements microbiens pour les carcasses chargées à une température supérieure à 7°C à cœur (scénarios alternatifs) par rapport à des carcasses maintenues en chambre froide (scénario de référence)

Les caractéristiques relatives aux cinétiques reconstituées sont disponibles dans les Tableaux 7a, b et c de l'étude de l'IFIP, référant les températures au chargement, les durées de stockage en chambre froide, en camion frigorifique et les durées totales (chambre froide + camion frigorifique). Sur les 908 cinétiques reconstituées, la température médiane au chargement est de 17,1°C [9,8°C ; 28,9°C]¹ à cœur et de 10,5°C [7,4°C ; 16,5°C] en surface, les durées de stockage médianes sont de 5,04h [1,33h ; 17,28h] en chambre froide, de 12,25h [4,25h ; 26,42h] en camion frigorifique, et de 17,33h [9,17h ; 32,58h] pour la durée totale.

Les distributions des accroissements obtenus pour les quatre microorganismes pour des carcasses maintenues en chambre froide sont présentées en Figure 12 et Tableau 6 de l'étude de l'IFIP ; puis les distributions des écarts d'accroissements obtenus entre les carcasses maintenues en chambre froide et celles refroidies en chambre froide puis en camion frigorifique sont présentées en Figure 13 et Tableau 8b de l'étude de l'IFIP. Ces écarts d'accroissement sont estimés, côté viande, à 0,10 log₁₀ [-0,08 ; 0,48] pour *L. monocytogenes* et à 0,07 log₁₀ [-0,06 ; 0,37] pour *Salmonella*. Concernant les flores d'altérations, ces accroissements sont estimés à 0,06 log₁₀ [-0,08 ; 0,55] pour *E. coli* et à 0,15 log₁₀ [-0,14 ; 0,87] pour *Pseudomonas*. Une analyse de variance multiple est proposée pour identifier les paramètres d'entrées influençant le plus les accroissements microbiens.

L'IFIP conclut qu'en comparaison à un stockage en chambre froide sans transport, les accroissements induits par le transport sont très limités, notamment au regard des hypothèses sécuritaires prises pour la modélisation.

- Comparaison des accroissements microbiens pour les carcasses chargées à une température supérieure à 7°C à cœur (scénarios alternatifs) par rapport à des carcasses chargées à 12°C puis transportées pendant 2h (scénario de référence)

Le scénario de référence utilisé par l'IFIP correspond à des carcasses sortant de l'abattoir dès que la température à cœur est de 12°C, pour une durée de transport de 2h (Arrêté du 18 décembre 2009 concernant la découpe à chaud). A partir des jeux de données disponibles, plusieurs scénarios alternatifs sont définis :

¹ Dans l'ensemble du document, les distributions sont caractérisées ainsi : médiane [2,5% ; 97,5%].

- Les carcasses sortent de l'abattoir dès que la température à cœur est de 12°C,
- Les carcasses sortent de l'abattoir dès que la température à cœur est au maximum de 15°C,
- Les carcasses sortent de l'abattoir dès que la température à cœur est de 15°C,
- Les carcasses sortent de l'abattoir dès que la température à cœur est de 18°C,

Pour l'évaluation de ces quatre scénarios alternatifs, aucune limite de durée de transport n'est fixée.

L'objectif est de comparer les accroissements microbiens en surface des carcasses chargées à une température supérieure à 7°C à cœur (scénarios alternatifs) par rapport à des carcasses chargées à une température de 12°C à cœur puis transportées pendant 2h (scénario de référence). Pour faire le lien entre les températures en surface et à cœur des carcasses, l'ensemble des cinétiques reconstituées est trié en quatre groupes selon la température à cœur lors du chargement (correspondant aux quatre scénarios alternatifs : 12°C, jusqu'à 15°C, 15°C et 18°C - tolérance de +/- 1°C). Les accroissements microbiens sont estimés, à partir de ces quatre groupes, non plus en utilisant l'évolution des températures à cœur mais celle des températures de surface.

Les caractéristiques relatives aux quatre groupes de cinétique établis sont disponibles dans les Tableaux 9a et b de l'étude de l'IFIP, référencant le nombre de cinétiques, les températures au chargement (cœur et surface) et les durées de transport en camion frigorifique. Les distributions des écarts d'accroissements microbiens obtenus pour les carcasses suivant le scénario de référence (12°C-2h) et celles suivant les scénarios alternatifs (12°C, jusqu'à 15°C, 15°C et 18°C) sont présentées dans les Tableaux 11a, b, c et d de l'étude de l'IFIP. Ces écarts d'accroissement entre le scénario de référence (12°C-2h) et le scénario alternatif (15°C-sans limite de temps) sont par exemple estimés, côté viande, à 0,40 log [-0,50 ; 0,80] pour *L. monocytogenes* et à 0,10 log₁₀ [-0,36 ; 0,41] pour *Salmonella*, assez proche en valeur pour cette dernière des écarts estimés pour *E. coli* (0,07 log₁₀ [-,50 ; 0,55]). Pour *Pseudomonas* ces écarts présentent une valeur médiane plus importante (1,02 log₁₀ [-1,00 ; 2,12]).

L'IFIP conclut qu'en comparaison au scénario de référence (12°C-2h), il existe peu de différences entre les scénarios alternatifs évalués (12°C, jusqu'à 15°C, 15°C et 18°C, sans limite de temps). Les écarts d'accroissement entre le scénario de référence (12°C-2h) et un chargement à 12°C sans limite de temps sont uniquement dus au temps de transport au-delà de 2h. Le scénario de chargement à des températures « jusqu'à 15°C » correspond à l'évolution des pratiques dans le cadre de la dérogation (L2009-n°0824). Pour le chargement à 18°C sans limite de durée de transport, l'écart médian avec le scénario de référence est de 0,3 log₁₀ maximum pour les pathogènes, plus important pour les flores d'altération (0,7 log₁₀ pour *Pseudomonas*).

- Pratiques actuelles de transport des carcasses de porcs

Les résultats du recueil des mesures des pratiques actuelles (mai 2013 - juin 2013) de transport de carcasses de porcs sont présentés dans les Tableaux 3a et 3b de l'étude de l'IFIP. Les températures à cœur du jambon sont de 11,80°C [4,10°C ; 15,20°C] au chargement et de 5,80°C [2,20°C ; 9,50°C] au déchargement; tandis que les températures en surface des poitrines sont de 4,10°C [1,00°C ; 11,10°C] au chargement et de 4,00°C [1,20°C ; 6,70°C] au déchargement.

Parmi les 886 camions contrôlés au chargement et les 407 camions contrôlés au déchargement, 189 d'entre eux sont contrôlés au chargement et au déchargement permettant de caractériser l'évolution des températures au cours du transport sur les mêmes carcasses et d'estimer la variabilité des durées de stockage en camion frigorifique. La diminution moyenne de température à cœur est de 5,8°C dans les camions frigorifiques pour une durée de 10,8h [3,4h ; 60,9h]. Il est précisé que les transports de plus de 55h correspondent aux temps classiquement observés entre un chargement le vendredi et un déchargement le lundi matin.

3.2. Pertinence de l'étude du pétitionnaire

3.2.1. Remarques sur la démarche générale et les flores utilisées

Concernant les flores testées, les deux pathogènes sélectionnés (*Salmonella* et *Listeria monocytogenes*) restent les pathogènes les plus pertinents à suivre pour la filière porcine. Les deux indicateurs microbiens *E. coli* et *Pseudomonas*, retenus par le pétitionnaire sont justifiés par un argumentaire technique et historique. Ils représentent effectivement adéquatement l'évolution respectivement des populations d'entérobactéries et de la flore aérobie, retenues comme critères d'hygiène des procédés dans le règlement européen (CE) n°2073/2005.

Le protocole expérimental retenu est décrit précisément. La volonté de démonstration de la comparabilité des situations est manifeste. Cette préoccupation de justesse expérimentale est illustrée par la reconstitution de cinétiques fractionnées lorsqu'il y a transport (prise en compte du refroidissement en chambre froide puis en camion frigorifique) et par l'ajustement de la durée des cinétiques (reconstituées ou non) comparées entre elles. La puissance de l'étude est améliorée par l'augmentation du nombre de cinétiques de température en chambre froide utilisé (trois cinétiques en 2008 contre environ 40 dans la nouvelle étude). L'utilisation de données issues de cinq entreprises et huit carcasses par entreprise permet de bien appréhender la variabilité inter et intra abattoirs.

Les hypothèses de simulation, identiques à celles de l'étude de 2008 (croissance simulée côté viande et côté couenne, pas de temps de latence, croissance en surface, etc.) restent pertinentes et conservatrices. Les paramètres utilisés pour la simulation probabiliste sont bien identifiés dans le rapport et les valeurs retenues n'appellent pas de commentaires. L'ensemble des cinétiques à cœur et en surface au cours des transports ou en chambre froide ont été mises à disposition.

Le protocole expérimental et la méthodologie générale (intégration temps-température) sont tout-à-fait appropriés pour aider le gestionnaire du risque à définir les conditions de dérogation à la réglementation actuelle qui conduiraient à une augmentation du niveau de risque acceptable. Les doutes du premier rapport sont levés : le pétitionnaire s'appuie sur plus de données et la base de comparaison entre carcasses transportées avant d'atteindre la température de 7°C à cœur et celles restant en chambre froide est pertinente.

3.2.2. Remarques relatives aux écarts d'accroissements entre les carcasses restant à l'abattoir et celles transportées avant d'atteindre la température de 7°C à cœur

Une vérification des résultats présentés pour une des flores bactériennes (*L. monocytogenes*) a été réalisée à partir des données des cinétiques transmises par le pétitionnaire, des équations et des paramètres d'entrée du modèle. Les résultats d'accroissements obtenus sont conformes à ceux présentés dans l'étude de l'IFIP.

Les résultats des simulations ne sont pas utilisés par le pétitionnaire dans la justification d'une nouvelle dérogation mais plutôt pour comparer les caractéristiques d'accroissement pour différents scénarios. De plus le pétitionnaire utilise les simulations pour identifier à l'aide d'une analyse de variance les principaux facteurs influençant l'accroissement bactérien entre les carcasses refroidies uniquement en chambre froide et celles refroidies en chambre froide puis chargées en camion frigorifique à des températures supérieures à 7°C (la gamme de température à cœur au moment du chargement variait entre 10°C et 30°C).

3.2.3. Remarques relatives à la proposition de scénarios alternatifs de dérogation et à l'évaluation de ces scénarios

L'utilisation de la dérogation actuellement existante (12°C–2h) comme situation de référence pour évaluer d'autres scénarios est contestable. En effet les carcasses transportées dans les conditions de la dérogation devraient être découpées dès leur arrivée dans les ateliers de découpe.

A l'analyse des données de durées de transport transmises par le pétitionnaire, il apparaît que 90 % des transports sont compris entre 3 h et 18 h. En conséquence, les carcasses considérées dans les scénarios alternatifs arrivent dans les ateliers de découpe à des températures proches ou inférieures à 7°C. Ainsi, l'objectif du pétitionnaire lors de sa demande de dérogation correspond à la recherche d'un gain de temps dans la logistique d'abattage/découpe des carcasses, et pas à mettre à disposition des ateliers de découpe des carcasses « chaudes ». Il eut donc été plus pertinent de comparer les scénarios alternatifs à la situation de « référence », c'est-à-dire des carcasses qui ne quittent l'abattoir que si leur température est inférieure à 7°C à cœur.

En outre, l'évaluation par scénarios conduit le pétitionnaire à trier parmi les cinétiques dont il dispose (cf 3.1.2, point 2). Il ne retient que celles qui présentent, lors du départ de l'abattoir, des températures à cœur correspondant aux scénarios envisagés. En conséquence, le nombre de cinétiques disponibles pour l'évaluation d'un scénario donné est faible et la variabilité des profils de température est très limitée. Le pétitionnaire perd ainsi une grande partie de l'information qu'il a collectée.

3.2.4. Remarques relatives aux données de températures des carcasses au moment du chargement à l'abattoir et à l'arrivée dans les ateliers de découpe

Les données transmises par le SNIV-SNCP confirment que la capacité frigorifique des camions permet le refroidissement à cœur des carcasses. Toutefois la représentativité de ces données et de la capacité frigorifique des camions ne peut pas être appréciée sans connaissance du plan d'échantillonnage (choix des camions échantillonnés). La Figure 1 représente la température à cœur des carcasses lors du déchargement des camions frigorifiques en fonction de la température à cœur de ces mêmes carcasses lors du chargement des camions et illustre ainsi la diminution de la température à cœur des carcasses entre le chargement et le déchargement.

Comme précisé précédemment, selon les données fournies par le pétitionnaire, la durée médiane des transports en camion frigorifique est de 10,8h [3,4h ; 60,9h], 90% des durées sont comprises entre 3h et 18h et le pétitionnaire précise que les transports de plus de 55h correspondent aux carcasses chargées le vendredi et déchargées le lundi matin. Cela reflète donc deux pratiques de transports : le transport de carcasses en semaine (les durées sont comprises entre 3h et 18h) et le transport de carcasses en fin de semaine (les durées sont supérieures à 55h).

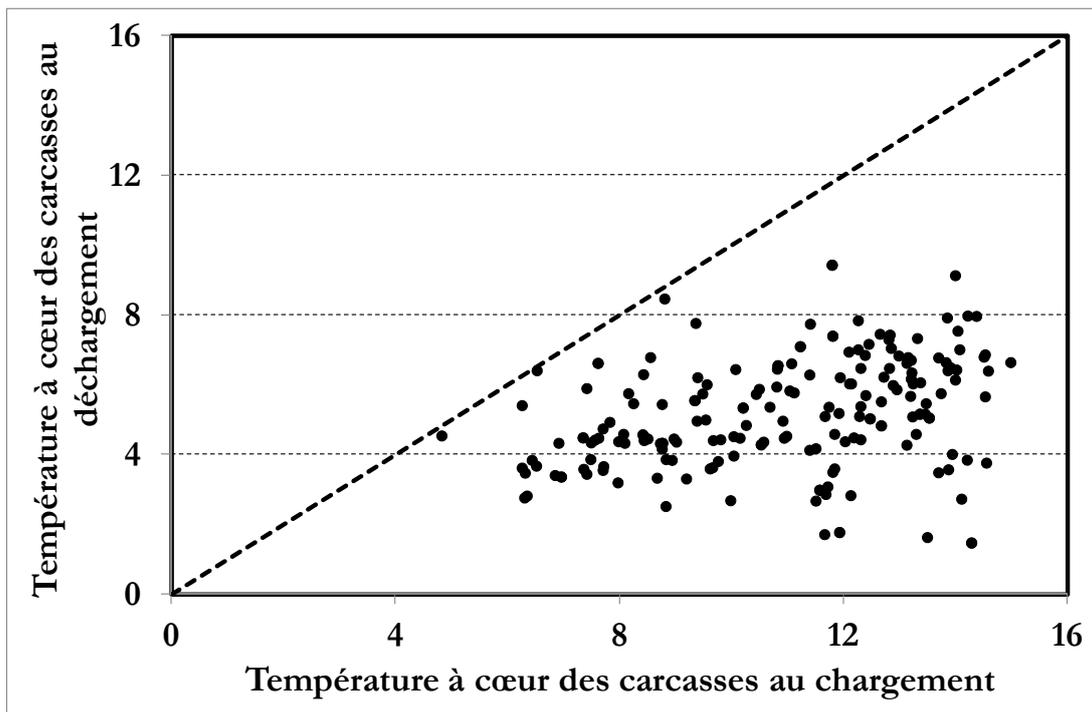


Figure 1. Températures (°C) moyennes mesurées à cœur (jambon) sur des carcasses à l'arrivée dans les ateliers de découpes en fonction des températures moyennes (n=9) prises au départ de l'abattoir. Les points sous la bissectrice correspondent à des transports pour lesquels une diminution de la température a été observée.

3.3. Modélisation des cinétiques de températures des carcasses

Pour apprécier la croissance bactérienne lors du refroidissement et du transport des carcasses de porcs, le pétitionnaire utilise directement les cinétiques des températures mesurées. Il est ici proposé de les modéliser. Cette modélisation des cinétiques de température permet de simuler la croissance pour des durées choisies dans les différentes étapes (chambre froide à l'abattoir, transport, stockage) précédant la découpe. En outre, cette modélisation permet de ne pas exclure de cinétiques et de garantir ainsi la bonne caractérisation de la variabilité des situations rencontrées.

3.3.1. Modélisation des cinétiques de températures à cœur des carcasses

Dans la chambre froide des abattoirs, la température à cœur des carcasses (notées T_c) décroît de façon exponentielle. Les cinétiques de refroidissement sont cependant variables en fonction des abattoirs (à relier aux différents systèmes de réfrigération) et de la carcasse considérée (variabilité notamment liée à la position des carcasses dans la chambre froide, ou à la densité de chargement de la chambre froide, voire à la différence de conformation entre carcasses).

Les données fournies par le pétitionnaire (5 abattoirs et 8 carcasses par abattoirs) ont été ajustées avec un modèle de décroissance exponentielle (cf Annexe 1). La variabilité des cinétiques de température à cœur dans les chambres froides est représentée sur la Figure 2.

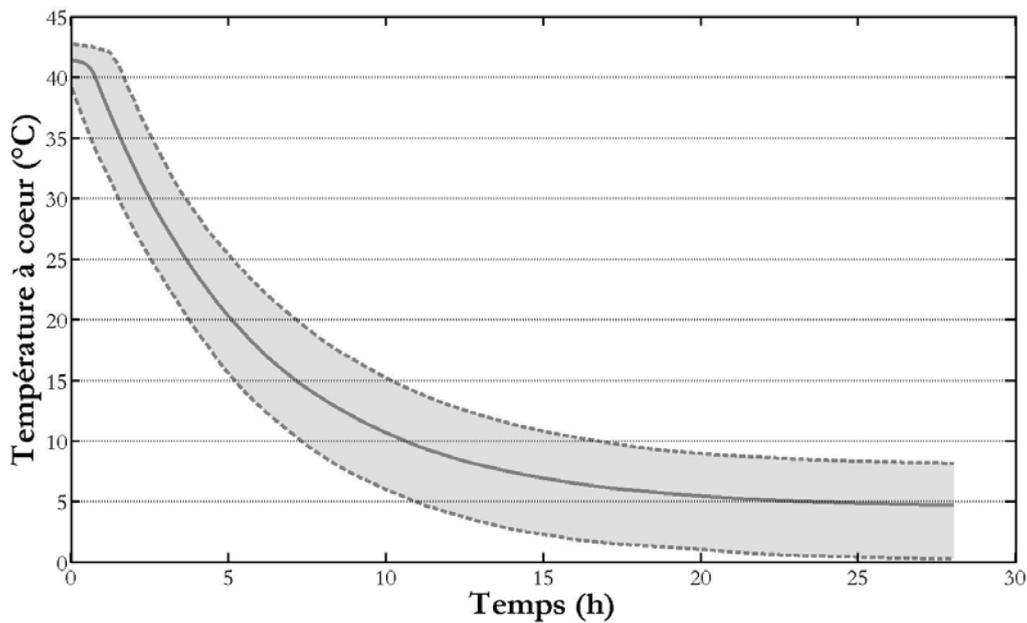


Figure 2. Cinétiques de refroidissement à cœur des carcasses en chambres froides. Trait continu, profil médian de refroidissement. Zone grisée entre les traits pointillés, intervalle de variabilité à 95% des profils possibles.

Ces cinétiques de température des carcasses en chambre froide sont notamment caractérisées par le paramètre de décroissance exponentielle, noté k_1 . La distribution des valeurs de k_1 obtenues sur les différentes carcasses est représentée sur la Figure 3.

En camion frigorifique, les profils de température à cœur des carcasses suivent également un modèle exponentiel de décroissance. La distribution des valeurs prises pour le paramètre de décroissance exponentielle (k_2) est également décrite sur la Figure 3. Les valeurs montrent qu'en moyenne la vitesse de refroidissement en camion frigorifique est plus faible qu'en chambre froide.

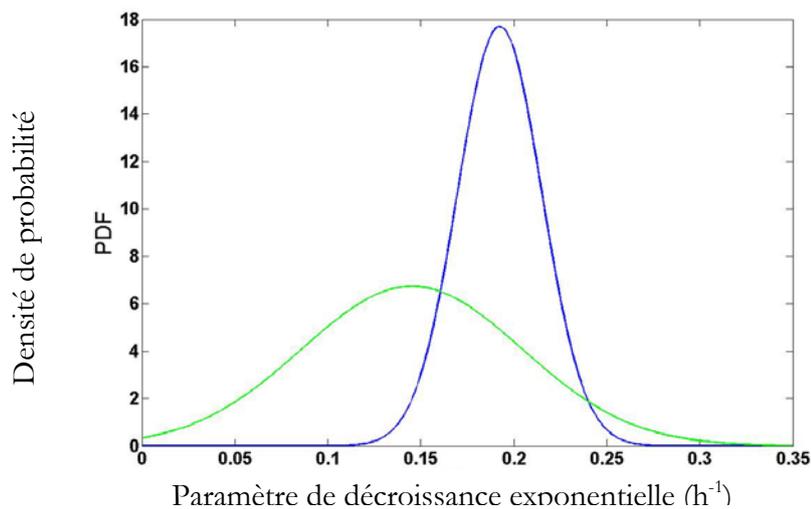


Figure 3. Distributions des paramètres k_1 (en chambre froide ; —) et k_2 (en camion frigorifique ; —) estimés, caractérisant la décroissance exponentielle de la température à cœur des jambons.

A partir de la température initiale des carcasses et des valeurs estimées des paramètres qui caractérisent le refroidissement en chambre froide et en camion (cf Annexe A.1), il est possible de simuler la température à cœur des carcasses pour ces deux conditions.

3.3.2. Modélisation de l'écart de température à cœur et en surface des carcasses

Les cinétiques de température à la surface des carcasses de porcs ne présentent pas de profil monotone. A la fin de la chaîne d'abattage (c'est-à-dire au début du refroidissement), la température au sein d'une carcasse est relativement homogène ; il existe une différence faible entre la température de surface et la température à cœur. Dans les premières heures, la température de surface va décroître plus rapidement que la température à cœur. Pendant cette première phase la température sera d'autant plus basse que des systèmes de réfrigération rapides sont utilisés. Après environ 5 heures de refroidissement, la température de surface augmente légèrement avant de diminuer par la suite.

L'écart entre la température de surface et la température à cœur peut-être décrite par un modèle (cf Annexe A.2). Le résultat de cette modélisation est présenté sur la Figure 4.

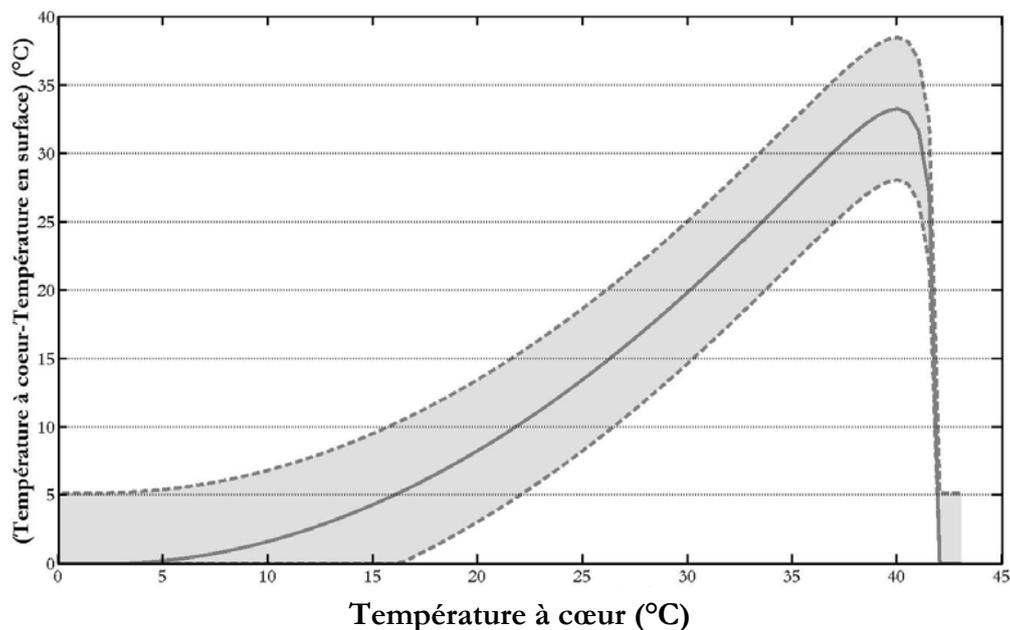


Figure 4. Ecart de température entre le cœur et la surface des jambons pendant le refroidissement en fonction de la température à cœur.

3.3.3. Estimation de l'évolution de la température en surface des carcasses

La température de surface, lieu de la croissance bactérienne, peut donc être décrite à l'aide des deux modèles précédents. Les profils de température simulés pendant le refroidissement (cf Figure 5) correspondent aux profils observés par le pétitionnaire (cf Annexe A.3).

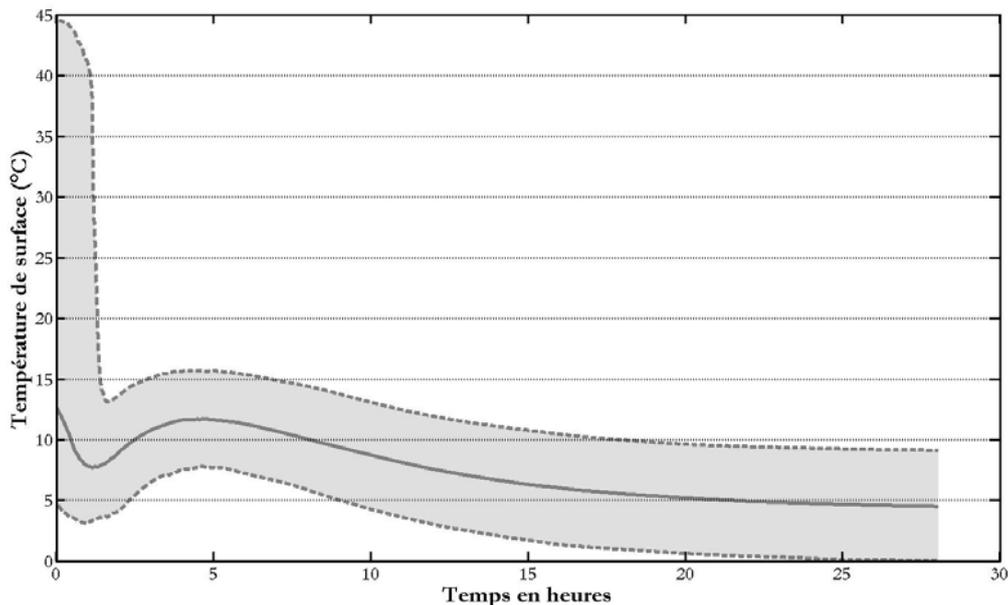


Figure 5. Cinétiques de refroidissement en surface des carcasses en chambres froides. Trait continu, profil médian de refroidissement. Zone grisée entre les traits pointillés, intervalle de variabilité à 95% des profils possibles.

3.3.4. Bilan de la modélisation des cinétiques de température

Les modèles développés permettent de remplacer les cinétiques utilisées par le pétitionnaire pour estimer la croissance en fonction des températures (à cœur et en surface) des carcasses de porcs pour différentes conditions de stockage en chambre froide et différentes durées de transport. La distribution des valeurs des paramètres des modèles reflète la variabilité des chambres froides des cinq abattoirs et de l'ensemble des transports en camion (cf 3.2.4).

3.4. Nouvelle définition de scénario de référence et d'évaluation des scénarios alternatifs possibles

L'analyse développée par la suite se limite aux deux pathogènes (*L. monocytogenes* et *Salmonella*), car seule l'évaluation de la croissance des pathogènes permet de répondre à la question sur le risque. Seule la croissance côté viande a été considérée car elle correspond à la situation la plus conservatrice. De plus l'évaluation des scénarios porte uniquement sur les transports réalisés en semaine (dont les durées sont comprises entre 3 et 18h). Les transports longs correspondant à des chargements de carcasses le vendredi pour une livraison le lundi n'ont pas été retenus car les données disponibles ne permettent pas d'évaluer la capacité des camions frigorifiques en situation de stationnement.

L'évaluation de scénarios alternatifs à ceux de la réglementation actuelle proposée par le pétitionnaire s'appuie sur la température à cœur au moment du chargement. Par exemple, il est proposé que les carcasses puissent sortir de la chambre froide de l'abattoir lorsque la température à cœur de 15°C est atteinte. Dans la pratique, cette règle de décision pour la sortie des carcasses n'est pas appropriée. En effet la température dans une chambre froide est variable d'une carcasse à l'autre en fonction de son emplacement et/ou de ses caractéristiques propres. Il est ainsi difficile d'envisager la sortie de certaines carcasses après 9 h de refroidissement, d'autres après 10 h et les dernières après 12 h par exemple. D'un point de vue pratique, appliqué par les abattoirs, il

semble plus pertinent de définir une durée de refroidissement en chambre froide qui permet de garantir qu'une certaine proportion (95% par exemple) des carcasses a atteint une température inférieure ou égale à 15°C. La modélisation des températures à cœur pour les différents abattoirs et les différentes carcasses montrent que plus de 95% des carcasses présentent des températures à cœur inférieures à 18°C, 15°C et 12°C après respectivement 8 heures, 10 heures et 15 heures (cf Figure 2). Ces temps de stockage en chambre froide sont utilisés dans la suite des simulations pour caractériser les carcasses correspondantes à des températures à cœur inférieures à 18°C, 15°C et 12°C.

Pour tester si des scénarios alternatifs au transport de carcasses de porcs refroidies à la température à cœur de 7°C sont envisageables, il est nécessaire de définir des scénarios de référence, c'est-à-dire de considérer différentes situations observables dans l'industrie et conformes avec le règlement actuellement en vigueur. Trois scénarios de référence (cas A, cas B et cas C) sont ainsi retenus et décrits ci-dessous. Les croissances de *L. monocytogenes* et de *Salmonella* correspondant à ces trois scénarios de référence ont été appréciées et comparées à des scénarios alternatifs dans lesquels les carcasses dérogent, lors du chargement dans les camions, à la température de 7°C.

3.4.1. Cas A : scénario de référence (12°C-2h), scénarios alternatifs (sortie des carcasses à 12°C, 15°C ou 18°C puis transport)

Le scénario de référence dans le premier cas s'inspire de la dérogation actuelle dans le cadre de la découpe à chaud, utilisée comme référence dans l'étude de l'IFIP. Dans cette situation les carcasses quittent l'abattoir quand la température à cœur est au maximum de 12°C (soit après environ 15h de réfrigération en chambre froide) puis sont transportées pendant deux heures maximum. La croissance de *L. monocytogenes* et *Salmonella* dans cette situation de référence a été comparée à celle obtenue pour des carcasses quittant l'abattoir à 12°C, 15°C et 18°C. Pour ces trois scénarios alternatifs, il a été considéré que les durées de transports étaient variables et comprises entre 3 heures et 18 heures (cet intervalle correspond à 90% des durées de transport d'après les données transmises par le pétitionnaire).

La Figure 6 illustre un exemple de profil temps-température pour le scénario de référence (12°C-2h ; courbe noire) et le scénario alternatif (15°C-sans limite de temps ; courbe grise).

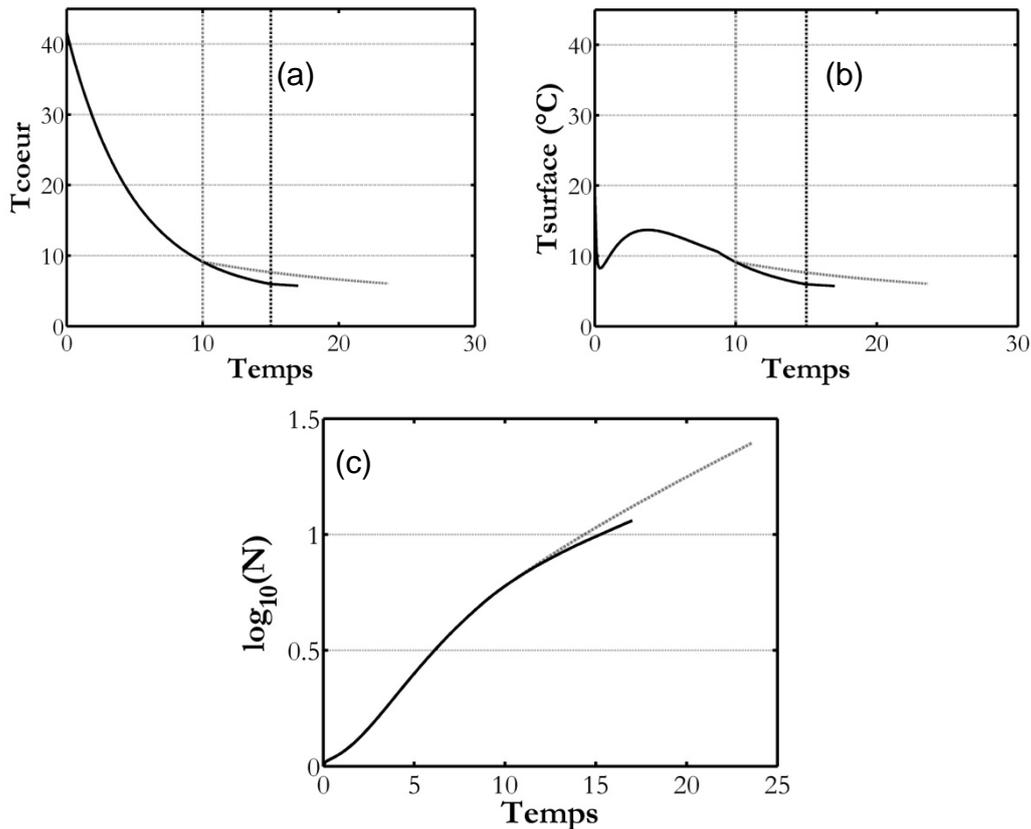


Figure 6. Exemple d'une série de cinétiques de refroidissement à cœur (a) et en surface (b) pour le scénario de référence (courbe noire) et le scénario alternatif 15°C (courbe grise) parmi les 10 000 séries de simulations réalisées. Les pointillés verticaux représentent le moment du chargement des camions selon le scénario de référence (pointillés noirs) et selon le scénario alternatif (pointillés gris). (c) Croissance de *L. monocytogenes* en surface des carcasses (côté viande) pour les deux situations.

La synthèse des écarts d'accroissement entre les scénarios alternatifs et le scénario de référence retenu par le pétitionnaire (cf remarque 3.2.4) est présentée dans le Tableau 1. La croissance estimée selon les scénarios alternatifs est plus importante que pour le scénario de référence. Selon le scénario 12°C (chargement à une température de 12°C à cœur équivalent à 15 h en chambre froide), la durée de transport plus longue (2 h pour le scénario de référence contre une durée comprise entre 3 et 18 h pour le scénario alternatif) explique à elle seule cette croissance plus importante. Pour les scénarios 15°C et 18°C, la différence de croissance est similaire à celle observée pour le scénario 12°C.

Tableau 1. Ecart d'accroissement (en \log_{10} (ufc)) entre les scénarios alternatifs et le scénario de référence (cas A)

Température à cœur de sortie de l'abattoir	scénario 12°C			scénario 15°C			scénario 18°C		
	2,5%	50%	97,5%	2,5%	50%	97,5%	2,5%	50%	97,5%
<i>Salmonella</i>	0,00	0,03	0,19	-0,03	0,02	0,17	-0,07	0,01	0,22
<i>L. monocytogenes</i>	0,00	0,15	0,61	-0,12	0,07	0,46	-0,20	0,04	0,46

3.4.2. Cas B : scénario de référence (sortie des carcasses à 7°C puis transport), scénarios alternatifs (sortie des carcasses à 12°C, 15°C ou 18°C puis transport)

Il est possible de définir une autre situation de référence. Ce scénario de référence reste conforme à la réglementation en vigueur (CE n°853/2004 et arrêté d'application français) et aux conditions actuelles de transport des carcasses, hors contexte découpe à chaud. Pour ce cas B, le scénario de référence est le suivant : les carcasses sont transportées quand la température à cœur atteint 7°C (les durées permettant d'atteindre la température de 7°C à cœur en chambre froide, d'après les données transmises par le pétitionnaire, sont environ de 24 heures). Puis les carcasses sont transportées, leur température reste inférieure à 7°C pendant toute la durée du transport. Comme indiqué précédemment, les durées de transport sont variables et comprises entre 3 et 18 heures en accord avec les données transmises par le pétitionnaire (cf remarque 3.2.5).

Pour les scénarios alternatifs, la croissance des pathogènes est estimée pour des carcasses qui présentent des températures à cœur inférieures à 18°C, 15°C et 12°C (c'est-à-dire refroidies en chambre froide pendant respectivement 8 heures, 10 heures et 15 heures).

Pour ce scénario de référence comme pour les scénarios alternatifs, la croissance est évaluée entre la fin de chaîne d'abattage et l'arrivée à l'atelier de découpe, sous l'hypothèse que la découpe s'effectue immédiatement à l'arrivée de la carcasse à l'atelier de découpe.

La Figure 7 illustre un exemple de profil temps-température pour le scénario de référence et le scénario alternatif 15°C.

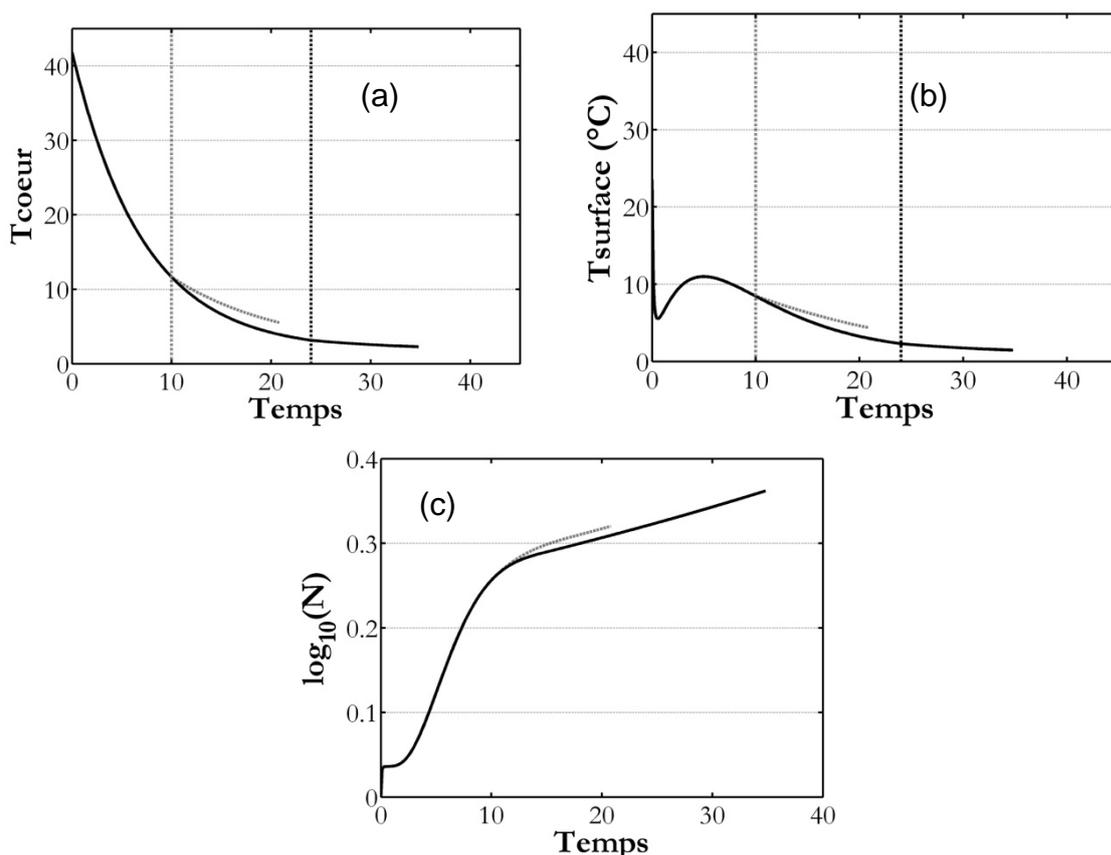


Figure 7. Exemples d'une série de cinétiques de refroidissement à cœur (a) et en surface (b) pour le scénario de référence (courbe noire) et le scénario alternatif 15°C (courbe grise) parmi les 10 000 séries de simulations réalisées. Les pointillés verticaux représentent le moment du chargement des camions selon le scénario de référence (pointillés noirs) et selon le scénario alternatif (pointillés gris). (c) Un exemple de croissance de *Salmonella* en surface des carcasses (côté viande) est représenté pour les deux situations.

La synthèse des écarts d'accroissement entre les scénarios alternatifs et le scénario de référence est présentée dans le Tableau 2. La croissance bactérienne pour les trois scénarios alternatifs est moins importante que pour le scénario de référence. La réfrigération des carcasses est moins rapide durant le transport qu'en chambre froide, mais cette moins bonne capacité de réfrigération est largement compensée, pour le potentiel de croissance des pathogènes, par le gain de temps logistique obtenu. En effet à durée de transport égale, les carcasses dans le cas des scénarios alternatifs arrivent à l'atelier de découpe respectivement 9, 14 et 16 h avant les carcasses dans la situation de référence. Pour ces scénarios la température des carcasses à l'arrivée de l'atelier de découpe n'est cependant pas systématiquement inférieure ou égale à 7°C.

Tableau 2. Ecart d'accroissement (en log₁₀ (ufc)) entre les scénarios alternatifs et le scénario de référence (cas B)

Température à cœur de sortie de l'abattoir	scénario 12°C			scénario 15°C			scénario 18°C		
	2,5%	50%	97,5%	2,5%	50%	97,5%	2,5%	50%	97,5%
Percentiles									
<i>Salmonella</i>	-0,14	-0,05	0,00	-0,19	-0,05	0,02	-0,27	-0,05	0,04
<i>L. monocytogenes</i>	-0,47	-0,18	0,00	-0,71	-0,27	0,00	-0,83	-0,30	0,00

3.4.3. Cas C : scénario de référence (sortie des carcasses à 7°C, transport et stockage – délai « entrée chambre froide abattoir – entrée atelier de découpe » de 72h), scénarios alternatifs (sortie des carcasses à 12°C, 15°C ou 18°C), transport et stockage – délai « entrée chambre froide abattoir – entrée atelier de découpe » de 72h)

Pour ce troisième cas, la situation est similaire au cas B sauf que l'on considère un stockage à l'arrivée dans l'atelier de découpe, avant que la carcasse ne soit effectivement découpée. Pour le scénario de référence comme pour les scénarios alternatifs, la croissance est évaluée pendant trois jours (délai entre l'abattage et la découpe).

La Figure 8 illustre un exemple de profil temps-température pour le scénario de référence et le scénario alternatif 18°C.

Les distributions des écarts de croissance entre la situation de référence et les trois scénarios alternatifs sont présentées dans le Tableau 3.

Dans ce cas le gain de temps logistique ne joue plus. La moins bonne capacité de réfrigération des camions par rapport aux chambres froides explique la croissance plus forte des pathogènes pour les trois scénarios alternatifs, mais les écarts médians sont au maximum de 0,05 log₁₀.

Tableau 3. Ecart d'accroissement (en log₁₀ (ufc)) entre les scénarios alternatifs et le scénario de référence (cas C)

Température à cœur de sortie de l'abattoir	scénario 12°C			scénario 15°C			scénario 18°C		
	2,5%	50%	97,5%	2,5%	50%	97,5%	2,5%	50%	97,5%
Percentiles									
<i>Salmonella</i>	-0,01	0,00	0,05	-0,04	-0,01	0,21	-0,08	0,02	0,38
<i>L. monocytogenes</i>	-0,04	0,01	0,12	-0,10	0,03	0,36	-0,13	0,05	0,56

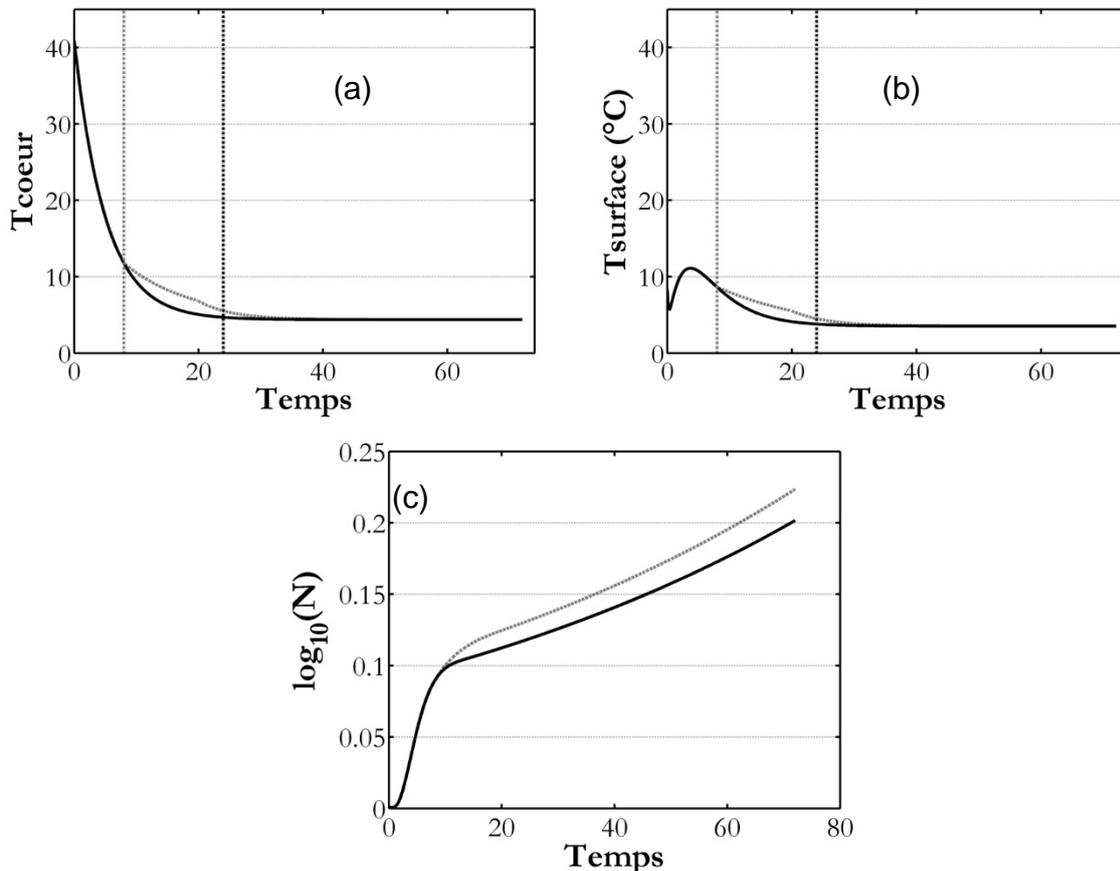


Figure 8. Exemple d'une série de cinétiques de refroidissement à cœur (a) et en surface (b) pour le scénario de référence (courbe noire) et le scénario alternatif 18°C (courbe grise) parmi les 10 000 séries de simulations réalisées. Les pointillés verticaux représentent le moment du chargement des camions selon le scénario de référence (pointillés noirs) et selon le scénario alternatif (pointillés gris). (c) Un exemple de croissance de *L. monocytogenes* en surface des carcasses (côté viande) est présenté pour les deux situations.

3.5. Réponse aux questions de la saisine

L'Anses est saisie des questions suivantes :

1. L'étude du pétitionnaire est-elle pertinente, tant sur le protocole utilisé que sur les critères microbiologiques retenus ?

Le protocole expérimental et la méthodologie générale (intégration temps-température) sont tout-à-fait appropriés pour aider le gestionnaire du risque à définir les conditions de dérogation à la réglementation actuelle qui conduiraient à une augmentation du niveau de risque acceptable. Les doutes du premier rapport sont levés : le pétitionnaire s'appuie sur plus de données et la base de comparaison entre carcasses transportées avant d'atteindre la température de 7°C à cœur et celles restant en chambre froide est pertinente (cf chapitre 3.2 « Pertinence de l'étude de l'IFIP »).

Toutefois l'utilisation de la dérogation actuellement existante (12°C-2h) comme situation de référence pour évaluer les scénarios alternatifs est contestable. L'évaluation par scénarios conduit le pétitionnaire à trier parmi les cinétiques dont il dispose. Il ne retient que celles qui présentent, lors du départ de l'abattoir, des températures à cœur correspondant aux scénarios envisagés. En conséquence, le nombre de cinétiques disponibles pour l'évaluation d'un scénario donné est faible et la variabilité des profils de température est limitée. Une grande partie de l'information collectée par le pétitionnaire est ainsi perdue.

Pour pallier ces deux points faibles, l'Anses propose dans cet avis de :

- Modéliser les cinétiques de températures des carcasses (chapitre 3.3) afin de simuler la croissance pour des durées choisies dans les différentes étapes (chambre froide à l'abattoir, transport, stockage) précédant la découpe. Cette modélisation permet de ne pas exclure de cinétiques et de garantir la prise en compte de la variabilité des situations rencontrées.
- Définir, à titre d'exemples, de nouveaux scénarios de référence et alternatifs possibles afin de simuler les écarts d'accroissement bactériens entre ces différents scénarios.

2. Les conclusions de l'étude sont-elles valides ?

L'étude du pétitionnaire produit de façon convaincante un volume important de données satisfaisantes pour apporter des conclusions. Il convient de rappeler que ces données sont obtenues dans des conditions conservatrices qui maximisent les estimations de croissance bactérienne. Les compléments apportés à l'étude du pétitionnaire permettent (i) de s'assurer d'une bonne appréciation des sources de variabilité et (ii) de comparer les scénarios alternatifs proposés par le pétitionnaire à une situation qui paraît plus conforme à la réglementation actuelle (cas C, et dans une moindre mesure cas B).

Comme précisé précédemment (cf chapitre 3.2.4 et 3.2.5), le cas A (scénario de référence : 12°C-2h), n'est sans doute pas le plus approprié pour établir une nouvelle dérogation. Concernant le cas B, la croissance microbienne est plus faible selon les scénarios alternatifs que le scénario de référence, grâce au gain de temps logistique. Cette situation correspond à un cas théorique pour lequel les carcasses sont découpées systématiquement dès leur arrivée dans les ateliers. Le cas C se rapproche plus des situations de terrain pour lesquelles les carcasses sont stockées, après le transport, dans les ateliers de découpe.

Cette démarche générale de modélisation doit permettre d'aider le gestionnaire du risque. Les tableaux proposés d'écarts d'accroissement (cf Tableau 1, 2 et 3) entre une situation proche de la réglementation actuelle et des scénarios alternatifs possibles pour deux pathogènes principaux de la filière peuvent aider le gestionnaire du risque à choisir une dérogation. Compte tenu des données présentées (cas B et C), l'optimisation du temps de stockage avant opérations chez le découpeur apparaît un paramètre complémentaire intéressant à associer à des mesures dérogatoires sur les conditions de transport des carcasses.

3. Quelle serait la température maximale acceptable (c'est-à-dire n'augmentant pas de manière significative le risque pour le consommateur vis-à-vis des germes pathogènes étudiés) de sortie des carcasses d'abattoir, dans la limite d'un temps de transport de deux heures ?
4. Si possible sur la base d'un couple temps/température, quelles pourraient être les valeurs maximales acceptables concernant la durée et la température de transport des carcasses de porcs ?

Pour répondre pleinement à ces questions, il est important de définir des niveaux de risque acceptable desquels il sera possible de déduire les objectifs de performance (augmentation maximum de la flore au cours du transport) et éventuellement de traduire ces objectifs de performance en critère de procédés (durée et température de transport, complété éventuellement par le temps de stockage à réception).

La cinétique temps/température des carcasses évoluant dans des conditions dynamiques entre l'abattoir et l'atelier de découpe, elle ne peut pas être limitée à un couple temps/température fixe pour le transport. Les modèles proposés permettront d'optimiser les conditions de refroidissement

dans l'abattoir et de stockage préalable à la découpe, en tenant compte des exigences et des performances du transport des carcasses entre ces deux étapes de la production.

Dans le cas où le gestionnaire du risque trouve un scénario acceptable en terme de niveau de risque, l'Anses peut aider à transcrire ce scénario dans la réglementation à l'aide de différents critères de procédé: durée de refroidissement en abattoir, température à cœur ou encore température de surface au moment du chargement.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail endosse les conclusions du CES BIORISK.

Marc Mortureux

MOTS-CLES

Carcasses ; porc ; ressuage ; dérogation

BIBLIOGRAPHIE

Comité scientifique de l'Afsca (2008). Avis 31-2008 : Transport à chaud des carcasses de porcs (dossier Sci Com 2008/23). Afsca.

Gill, C. O., Harrison, J. C. L. and Phillips, D. M. (1991). Use of a temperature function integration technique to assess the hygienic adequacy of a beef carcass cooling process. *Food Microbiology*, 8, 83-94.

Jericho, K. W. F., O'Laney, G. O. and Kozub, G. C. (1998). Verification of the hygienic adequacy of beef carcass cooling processes by microbiological culture and the temperature-function integration technique. *Journal of Food Protection*, 61, 1347-1351.

Mc Meekin, T. A., (2007). Predictive microbiology: Quantitative science delivering quantifiable benefits to the meat industry and other food industries. *Meat science*, 77, 17-27.

ANNEXES

A.1. Modélisation de la cinétique de refroidissement à cœur des carcasses

A.1.1. Modèle pour la réfrigération en chambre froide

Les données du pétitionnaire incluent l'enregistrement, dans différents abattoirs français, de la température de surface (T_s) de carcasses. Les cinétiques de température enregistrées à la surface des carcasses de porcs dans les 5 abattoirs ne sont pas monotones, c'est-à-dire que leurs sens de variation changent sur l'intervalle de temps mesuré. Ces cinétiques de température ne restent pas uniquement décroissantes, on observe ponctuellement des augmentations de température à cœur, pouvant notamment être associées à des transferts de chaleur.

Pour 37 carcasses, la température de surface et la température à cœur (T_c) sont disponibles. L'évolution de la température à cœur des carcasses (T_c) au cours du temps (t) peut être décrite par un modèle de décroissance exponentielle avec délai (cf Equation 1) :

$$T_c(t) = \begin{cases} T_0 & t \leq d \\ T_a + (T_0 - T_a) \cdot \exp(-k_1 \cdot t) & t > d \end{cases} \quad \text{Equation 1}$$

Où $T_c(t)$ est la température à cœur des jambons à un temps (t) donné, T_0 est la température à cœur initiale des jambons, T_a est la température à cœur asymptotique des jambons, d est le délai avant la décroissance exponentielle de la température, caractérisée par le paramètre k_1 .

La Figure A.1 illustre un exemple d'ajustement de ce modèle à une des cinétiques de température à cœur des jambons enregistrées par le pétitionnaire (parmi les 37 cinétiques disponibles).

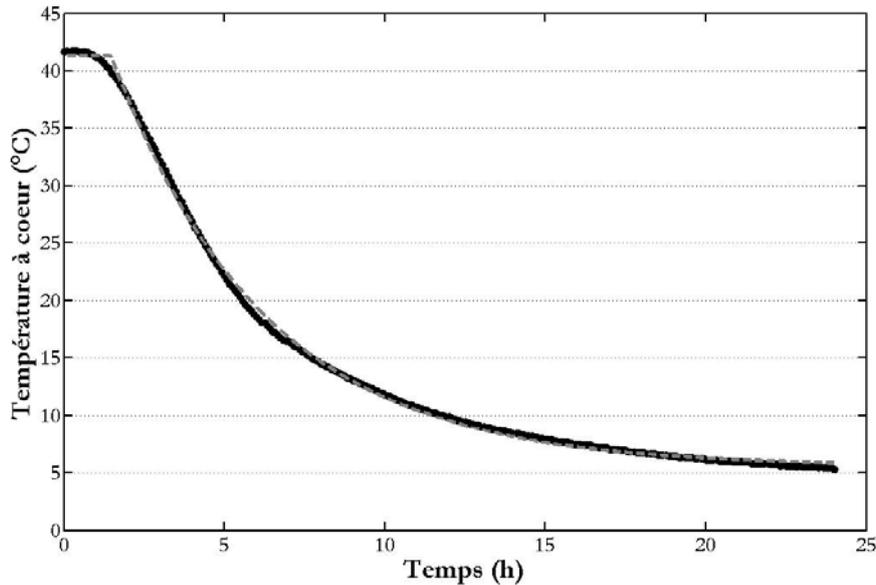


Figure A.1 : Ajustement d'une des 37 cinétiques fournies par le pétitionnaire de températures à cœur des jambons de carcasses refroidies en chambre froide.

A.1.2. Modèle pour la réfrigération en camion frigorifique

Pour 40 carcasses transportées (chargées dans les cinq abattoirs et dans plus de 35 camions différents), la température à cœur est disponible. Ces cinétiques ont été ajustées à l'aide du même modèle que celui utilisé pour les carcasses en chambre froide mais sans latence avant décroissance exponentielle :

$$T_c(t) = T_a + (T_0 - T_a) \cdot \exp(-k_2 \cdot t) \quad \text{Equation 2}$$

Les paramètres sont identiques à l'équation 1.

Les valeurs obtenues pour le paramètre k_2 révèlent que la vitesse de refroidissement des carcasses dans les camions est moins rapide que dans les chambres froides.

A.2. Modélisation de l'écart entre la température à cœur et en surface des carcasses

L'écart entre la température de surface des carcasses et celle à cœur peut être modélisé à l'aide du modèle suivant :

$$(T_c - T_s) = \frac{E_{\max} (T_c - 42)(T_c - T_{CE \min})^2}{(T_{CE \max} - T_{CE \min}) \left[(T_{CE \max} - T_{CE \min})(T_c - T_{CE \max}) - (T_{CE \max} - 42)(T_{CE \max} + T_{CE \min} - 2T_c) \right]} + N(0, \sigma)$$

Équation 3

Où T_c est la température à cœur, T_s est la température de surface, $T_{CE \max}$ est la température à cœur pour laquelle l'écart (E_{\max}) de température entre le cœur et la surface est maximal, $T_{CE \min}$ est la température à cœur pour laquelle l'écart de température entre le cœur et la surface est minimal et σ est l'écart type caractéristique de la variabilité entre carcasses.

La Figure A.2 illustre l'ajustement de ce modèle aux données, fournies par le pétitionnaire, de température à cœur et en surface des carcasses.

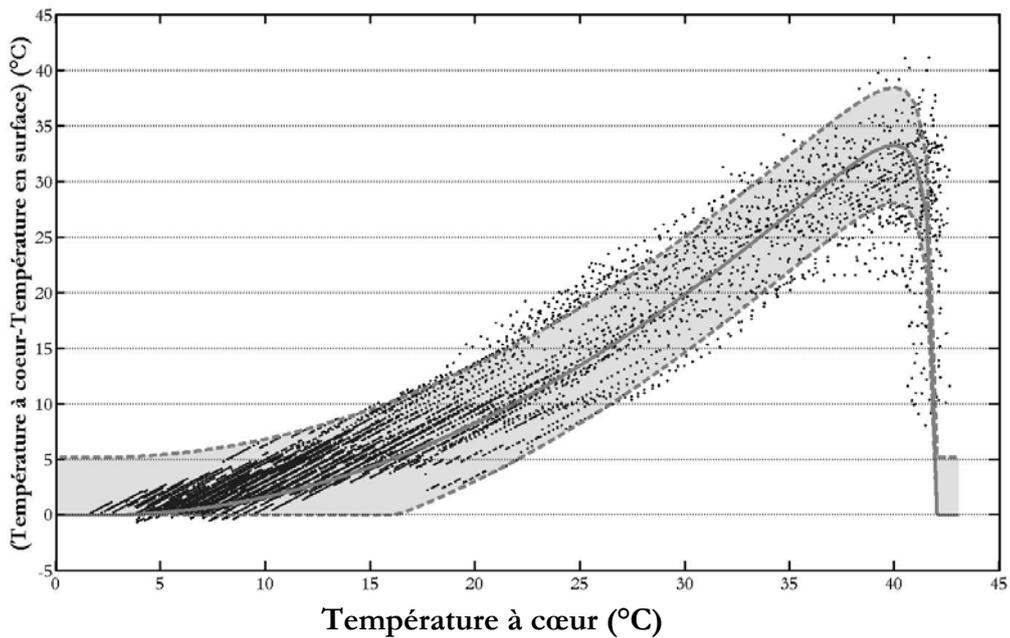


Figure A.2 : Ecart de température entre le cœur et la surface des jambons en fonction de la température à cœur.

A.3 : Estimation de l'évolution de la température en surface des carcasses

A partir des équations (1) et (2), il est possible de prédire la température à la surface des carcasses à partir de la température à cœur des carcasses (cf Figure A.3).

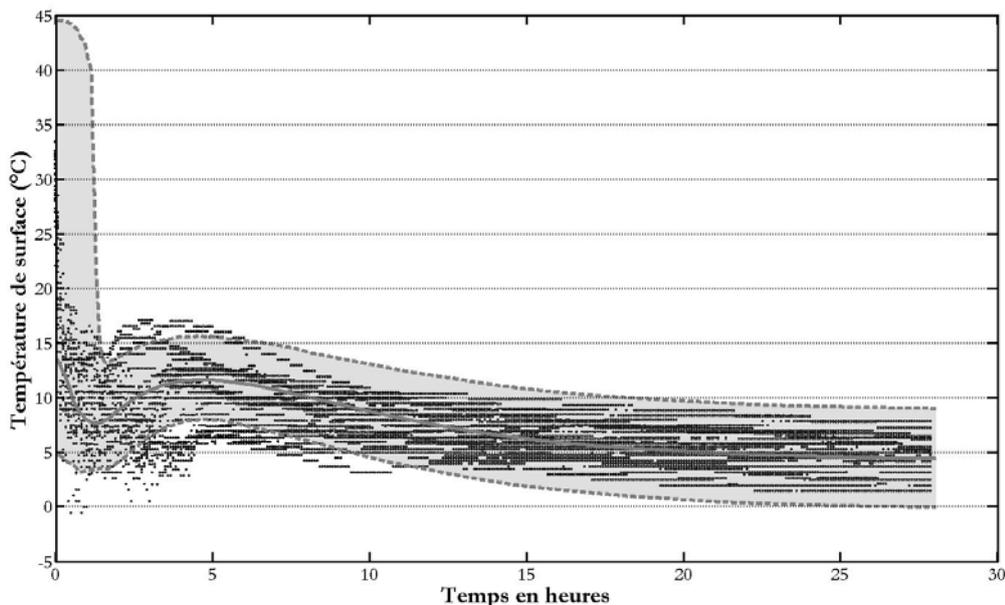


Figure A.3 : Cinétiques de température de surface des carcasses simulées à partir des équations 1 et 2 (et des paramètres des tableaux ci-dessous) et observées par le pétitionnaire.

A.4. Calcul des écarts d'accroissement microbien

A.4.1. Modèle pour l'appréciation de la croissance

Le modèle primaire utilisé est le modèle logistique avec délai et rupture décrit par l'équation 4.

$$\ln N = \begin{cases} \ln N_0 & , t \leq lag \\ \ln N_{\max} - \ln \left(1 + \left(\frac{N_{\max}}{N_0} - 1 \right) \exp(-\mu_{\max} (t - lag)) \right) & , t > lag \end{cases} \quad \text{Équation 4}$$

où N représente la densité bactérienne au temps t (h), N_0 représente la densité bactérienne initiale, N_{\max} , la densité bactérienne maximale, lag , le temps de latence (h) et μ_{\max} le taux de croissance maximal (h^{-1}).

Pour décrire l'effet de la température, du pH et de l'aw sur la croissance le modèle suivant a été utilisé :

$$\mu_{\max} = \mu_{opt} \cdot CM_2(T) \cdot CM_2(pH) \cdot CM_2(a_w)$$

$$CM_2(X) = \begin{cases} 0, & X \leq X_{min} \\ \frac{(X - X_{min})(X - X_{max})^n}{(X_{opt} - X_{min})^{n+1} [(X_{opt} - X_{min})(X - X_{opt}) - (X_{opt} - X_{max})(n-1)X_{opt} + X_{min} - 2X]]} & X_{min} < X < X_{max} \\ 0, & X \geq X_{max} \end{cases}$$

Equation (5).

Où μ_{\max} est le taux de croissance maximal, μ_{opt} est le taux de croissance dans les conditions de température, pH et aw optimales, X_{min} , X_{opt} et X_{max} sont respectivement les valeurs minimale, optimale et maximale de croissance.

A.4.2. Calculs des potentiels de croissance

Les calculs réalisés dans la partie 3.4 prennent en compte différentes sources de variabilité. Ces sources intègrent la variabilité des caractéristiques de croissance des souches (cf Tableau A.4.a), la variabilité en lien avec les caractéristiques propres aux carcasses (pH) côté viande et avec les conditions dans lesquelles elles sont refroidies et transportées (cf Tableau A.4.b).

Afin de calculer la croissance pour un scénario donné :

- 10 000 profils de température à cœur des carcasses sont générés (équations 1 et 2),
- les profils de température en surface sont ensuite estimés (équation 3),
- la croissance pour les deux flores pathogènes est calculée sur la base de ces profils de température (équations 4 et 5).

La Figure A.4 illustre la structure générale du modèle :

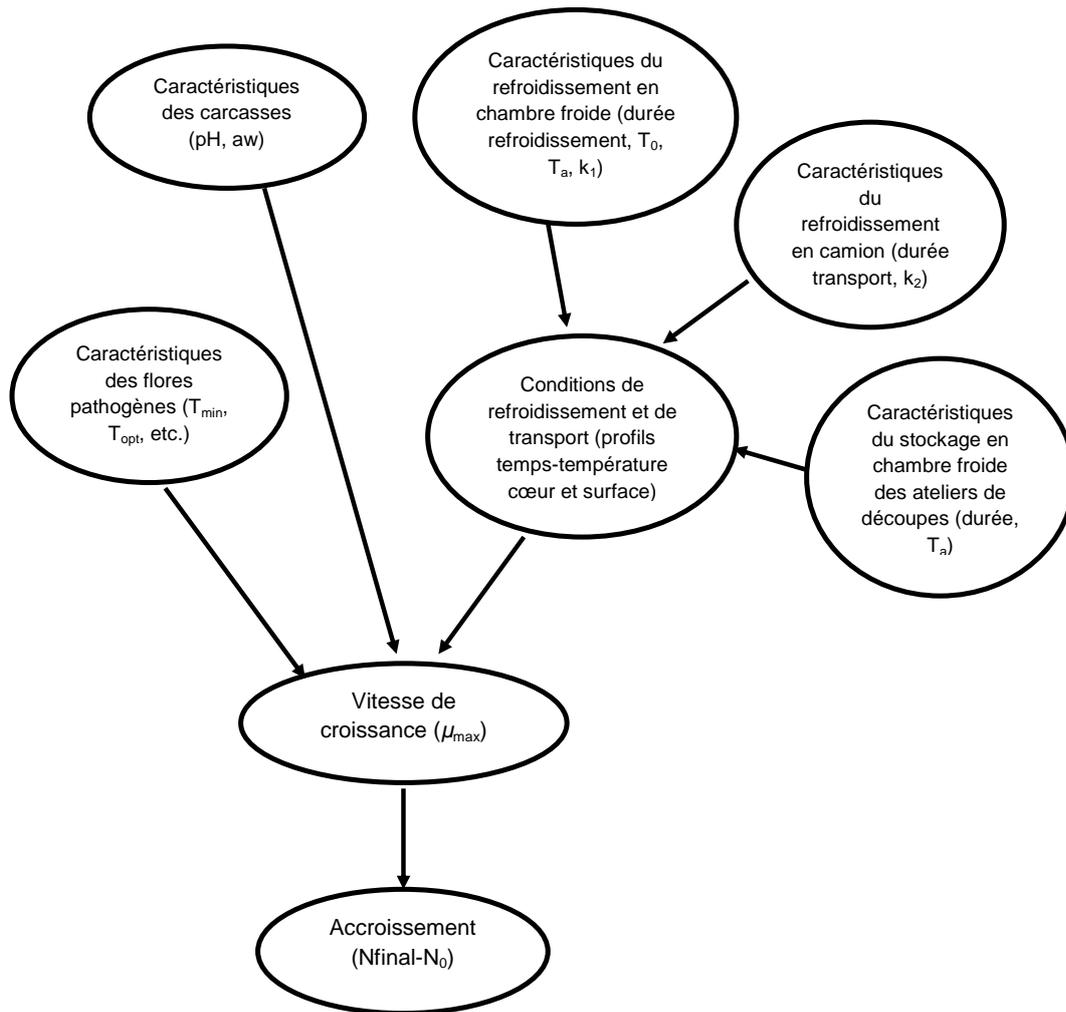


Figure A.4 Représentation simplifiée de la démarche de modélisation

Tableau A.4.a. Liste des paramètres microbiologiques utilisés pour l'appréciation de la croissance des deux pathogènes (données reprises du rapport du pétitionnaire)

Paramètres microbiologiques	Unités	Symbole	Type de paramètre	<i>L. monocytogenes</i>	<i>Salmonella</i>	
	ufc	N_0	F	1	1	
Paramètres du modèle primaire (Equation 4)	h	lag	F	0	0	
	$\log_{10}(ufc)$	$\log_{10} N_{max}$	V	N(9,0 ; 0,1)	N(8,5 ; 0,13)	
Paramètres du modèle secondaire (Equation 5)	°C	T_{min}	V	N(-1,3 ; 1,1)	N(4,66 ; 0,63)	
	°C	T_{opt}	V	N(38,2 ; 0,7)	N(39,56 ; 0,66)	
	°C	T_{max}	V	N(43,3 ; 1,1)	N(45,88 ; 0,53)	
		pH_{min}	V	N(4,2 ; 0,1)	N(3,17 ; 0,30)	
		pH_{opt}	F	7	7	
		aw_{min}	V	N(0,922 ; 0,009)	N(0,941 ; 0,006)	
		aw_{max}	F	0,997	0,997	
		aw_{opt}	F	1	1	
		h^{-1}	μ_{opt}	V	N(1,24 ; 0,17)	N(1,74 ; 0,24)

F : valeur du paramètre fixe ; V : valeur du paramètre variable ; N : loi Normale

Tableau A.4.b. Liste des paramètres utilisés pour générer les profils temps-température et pour caractériser les carcasses (pH et aw)

Paramètres technologiques	Unités	Symbole	Type de paramètre	Valeurs
Caractéristiques des carcasses (côté viande uniquement)	-	pH	V	N(6,3 ; 0,5)
	-	aw	F	0,995
Refroidissement à cœur en chambre froide (équation 1)	h	d	V	U(0 ; 1,5)
	h^{-1}	k_1	V	N(0,192 ; 0,022)
	°C	T_a	V	N(4,5 ; 1,3)
	°C	T_0	V	N(41,5 ; 0,6)
Refroidissement à cœur en camion (équation 2)	h^{-1}	k_2	V	N(0,145 ; 0,059)
	°C	T_a	V	N(4,5 ; 1,3)
Relation entre cœur et surface (équation 3)	°C	E_{max}	F	33,2
	°C	$T_{C_{Emin}}$	F	2
	°C	$T_{C_{Emax}}$	F	40
	°C	σ	V	N(0 ; 2)
Durée de séjour en chambre froide	h	d_{cf}	V	8 ; 10 ; 15 ou 24 selon les scénarios alternatifs ou de référence
Durée de transport en camion frigorifiques	h	$d_{transport}$	V	U(3 ; 18)
Durée de stockage dans les ateliers de découpes	h	$d_{atelier}$	V	0 (pour les cas A et B) 72- d_{cf} - $d_{transport}$ (pour le cas C)

F : valeur du paramètre fixe ; V : valeur du paramètre variable.

N : loi Normale ; U : loi uniforme