



anses

Maîtrise du risque microbiologique dans les fromages et produits laitiers au lait cru – Partie 2

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Décembre 2025



anses

Le directeur général

Avis de l'Anses
Saisine n° 2019-SA-0033

Maisons-Alfort, le 9 décembre 2025

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

**relatif aux modalités de maîtrise du risque lié à la présence de dangers
microbiologiques dans les fromages et autres produits laitiers fabriqués à
partir de lait cru**

2^{ème} partie : Réponses aux questions A3, A5 et A6¹

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 la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux, l'évaluation des propriétés nutritionnelles et fonctionnelles des aliments et, en évaluant l'impact des produits réglementés, la protection de l'environnement.

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 publiés sur son site internet.

L'Anses a été saisie le 22 février 2019 par la Direction générale de l'alimentation (DGAL) d'une demande d'avis sur les modalités de maîtrise du risque lié à la présence de dangers bactériologiques dans les fromages et produits laitiers fabriqués à partir de lait cru.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

1.1. Contexte

Les produits laitiers au lait cru et les fromages fabriqués à partir de lait cru font régulièrement l'objet de procédures de retrait-rappel et peuvent être notamment impliqués dans l'apparition de cas groupés de salmonelloses et de syndromes hémolytiques et urémiques (SHU). Les alertes épidémiologiques interrogent sur l'état des connaissances et l'efficacité des mesures de maîtrise pouvant être mises en œuvre dans la filière des fromages et autres produits laitiers fabriqués à partir de lait cru ainsi que sur l'évaluation de leur impact sur la réduction du risque pour le consommateur.

¹ L'avis répondant aux questions A1 et A2 est disponible sous : [AVIS de l'Anses relatif aux modalités de maîtrise du risque lié à la présence de dangers microbiologiques dans les fromages et autres produits laitiers fabriqués à partir de lait cru](#)

1.2. Objet de la saisine

La DGAL a saisi l'Anses pour réaliser six actions :

A1 – Etablir quels sont les principaux dangers bactériens en lien avec les différents fromages et produits laitiers fabriqués à partir de lait cru en France.

A2 – Réaliser un bilan des connaissances relatives aux sources de contamination, aux mesures de maîtrise et à leur efficacité dans 3 principales filières laitières (bovins, ovins, caprins), depuis le stade de l'élevage jusqu'au stade de distribution et de consommation, en passant par le stade de transformation des fromages et des produits laitiers fabriqués à partir de lait cru.

A3 – Evaluer l'impact des mesures de maîtrise sur la réduction du risque pour le consommateur.

A4 – Faire le point sur les méthodes analytiques (liste, performance, ...) disponibles pour la recherche des pathogènes dans les matrices.

A5 – Quantifier la performance de l'échantillonnage pour la maîtrise des risques.

A6 – Proposer des pistes de recherche pour améliorer la maîtrise des risques dans les fromages et produits laitiers fabriqués à partir de lait cru.

La réponse aux actions A1 et A2 a été publiée en 2022 (Anses 2022). À la suite d'échanges au fil des travaux avec la DGAL, il a été acté que l'action A4 n'était plus d'actualité. Ce second avis porte donc sur les actions A3, A5 et A6.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

2.1. Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié l'instruction de cette seconde partie de la saisine au groupe de travail (GT) « Fromages au lait cru » (FALC2), créé par décision du 05 octobre 2022 et rattaché au comité d'experts spécialisé « Évaluation des risques biologiques dans les aliments » (CES BIORISK). Le mandat du GT FALC2 était de réaliser les actions 3, 5 et 6 de la saisine. Les travaux d'expertise du GT FALC2 ont été soumis régulièrement au CES BIORISK (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques), entre janvier 2023 et septembre 2025. Ils ont été adoptés par le CES BIORISK réuni le 19 septembre 2025.

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 (Janvier 2024) ».

2.2. Prévention des conflits d'intérêt

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 publiées sur le site internet : <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

2.3. Méthode d'expertise

Afin de répondre aux questions relatives à l'efficacité des mesures de maîtrise (A3) et de performance de l'échantillonnage (surveillance) (A5) sur le risque associé à la consommation

de fromages au lait cru, le GT FALC2 a d'abord identifié les mesures de maîtrise puis utilisé une démarche d'appréciation quantitative du risque microbiologique (AQRM).

Concernant la sélection des mesures de maîtrise aux stades de la ferme et de la fabrication à intégrer dans la modélisation, le GT FALC2 s'est appuyé sur la liste du premier avis (Anses, 2022), complétée par des auditions (DGAL) et une revue systématique de la littérature (2019-2023) selon la démarche PRISMA. Trois filtres ont été appliqués pour sélectionner les mesures à tester : la quantification des effets, le poids des preuves et la compatibilité avec la situation française. Pour la surveillance, le GT a retenu les pratiques recensées, les demandes du gestionnaire et les exigences réglementaires. En ce qui concerne les mesures en lien avec le consommateur, elles ont été sélectionnées sur la base de l'avis de l'Anses de 2022.

L'AQR suit l'approche standard d'évaluation des risques microbiologiques (identification du danger, caractérisation du danger, évaluation de l'exposition, caractérisation du risque), conformément au cadre proposé par le Codex Alimentarius (CXG-30, 1999) et par le document guide la FAO & WHO de 2021. L'évaluation des risques a tout d'abord estimé quantitativement le niveau de risque associé aux mesures actuelles de maîtrise et de surveillance, ci-après dénommées « scénario de base ». Lorsque les pratiques actuelles présentaient une forte hétérogénéité, le GT a défini le scénario de base en retenant les pratiques jugées les plus représentatives au regard des connaissances disponibles. L'évaluation quantitative a permis ensuite de modéliser ce qu'il adviendrait du niveau de risque si les mesures de maîtrise et de surveillance étaient modifiées ou si de nouvelles mesures étaient mises en place, ci-après dénommées « scénario à tester ». Cette démarche a été accompagnée d'une analyse qualitative de l'incertitude selon la méthode ACCMER² et d'une analyse de sensibilité quantitative basée sur les paramètres incertains du modèle.

La réponse à la question A6 repose sur l'analyse des incertitudes, l'examen des résultats de modélisation et l'identification de nouvelles pistes d'action par les experts du GT.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES [+/- GT] [OU DU GECU]

3.1. Liste des couples retenus pour l'appréciation quantitative des risques

L'Anses a publié en 2022 la première partie de son expertise relative aux deux premières questions, concernant les priorités en termes de santé publique des différents dangers microbiologiques et catégories de fromages. Cette expertise s'appuyait sur une hiérarchisation des risques, l'attribution des sources (données d'épidémies), l'analyse des retraits/rappels et la priorisation des dangers (STEC, *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*) pour les catégories de fromages concernées. Les experts du GT FALC2 confirment que les conclusions de 2022 restent pleinement valides et que la liste des agents pathogènes à considérer n'a pas évolué entre la première partie de l'expertise et cette seconde partie.

² ACCMER : Accompagnement des recommandations du GT MER (Méthodologie de l'évaluation des risques)

Tableau 1 : Liste des onze situations prises en considération dans le développement du modèle AQR

Dangers	Catégories de fromages	Espèces
STEC	Pâte pressée non cuite à affinage court (PPNCC)	Bovin
	Pâte pressée non cuite à affinage court (PPNCC)	Ovin
	Pâte molle à croûte fleurie (PMCF)	Bovin
	Pâte molle à croûte fleurie (PMCF)	Caprin
<i>L. monocytogenes</i>	Pâte molle à croûte lavée (PMCL)	Bovin
	Pâte pressée non cuite à affinage court (PPNCC)	Bovin
	Pâte molle à croûte fleurie (PMCF)	Caprin
	Pâte molle à croûte fleurie (PMCF)	Bovin
<i>Salmonella</i>	Pâte molle à croûte fleurie (PMCF)	Bovin
	Pâte molle à croûte fleurie (PMCF)	Caprin
	Pâte pressée non cuite à affinage court (PPNCC)	Bovin

Si les travaux du GT FALC1 ont fourni la base de priorisation des dangers et des catégories de fromages, la sélection finale de onze combinaisons danger/fromage/espèce animale (Tableau 1) a été opérée par le GT FALC2, en cohérence avec l'objectif de modélisation et l'état des connaissances.

3.2. Mesures de maîtrise considérées dans le modèle

Le modèle a été conçu pour évaluer l'impact des mesures de maîtrise et de surveillance sur le risque sanitaire, en considérant la situation actuelle des pratiques dans les filières, c'est-à-dire la bonne application des mesures existantes et la surveillance telle qu'elle est mise en œuvre aujourd'hui. Certaines mesures testées sont nouvelles, tandis que d'autres visent à renforcer ou généraliser les bonnes pratiques déjà en place.

3.2.1. Mesures de maîtrise dans les élevages, de l'animal au lait de tank

- **Cas des STEC**

Parmi les mesures de maîtrise établies par le premier GT FALC (GT FALC1) et mises à jour (sur la période 2019-2023), celles concernant les STEC (*Escherichia coli* productrice de Shiga-toxines) retenues après application des filtres de sélection relèvent de quatre catégories principales : (i) alimentation des animaux (qualité des ensilages et enrubannages), (ii) conditions d'hébergement (hygiène des locaux et litières), (iii) gestion des troupeaux (limiter l'introduction d'animaux porteurs, notamment les souches O26:H11 stx2a/stx2d), et (iv) hygiène de la traite (Figure 1).

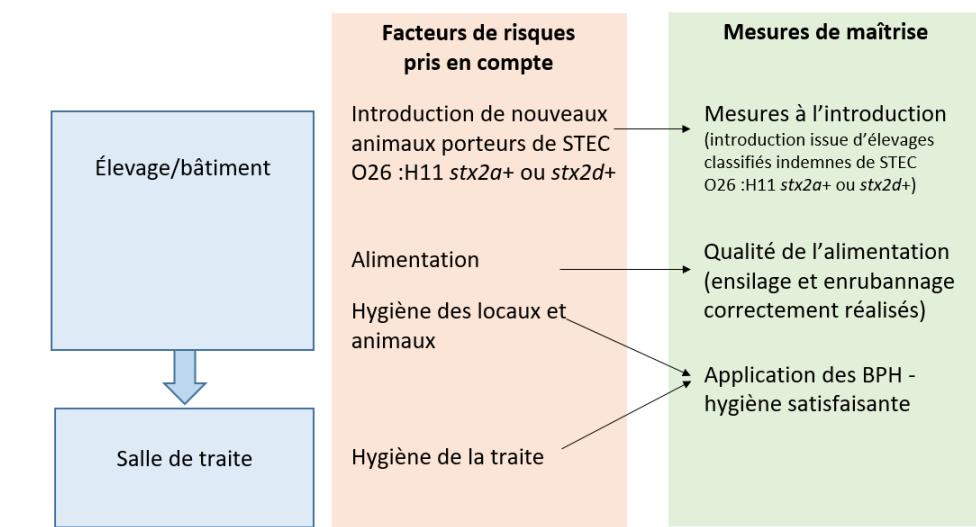


Figure 1 : Synthèse des facteurs de risque pour les STEC au stade de la ferme et mesures de maîtrise correspondantes

En matière de surveillance, dans la filière laitière, les pratiques actuelles reposent, pour le lait collecté par des entreprises, sur le dénombrement des *E. coli* dans le lait de tank des fermes, complété en cas de non-conformité par une surveillance renforcée (Tableau 2).

Tableau 2 : Surveillance de routine des STEC dans les élevages. Synthèse des pratiques actuelles et des scénarios à tester pour les fermes dont le lait est collecté par des entreprises

Stade de la surveillance	Cible bactériologique	Pratiques actuelles	Scénario de base	Scénarios à tester
Troupeaux	STEC	Pas de connaissance du statut des troupeaux	Pratiques actuelles	Troupeaux indemnes de STEC O26:H11 stx2a+ et/ou stx2d+: pas d'import d'animaux provenant de fermes non-indemnes de ce type de bactéries
Lait à la ferme	STEC	Pas de recherche en routine	Pratiques actuelles	<u>Recherche si dépassement du critère <i>E. coli</i>:</u> En même temps que les prélèvements pour dénombrement de <i>E. coli</i> , recherche dans le lait de tank ($n = 1$) En même temps que les prélèvements pour dénombrement de <i>E. coli</i> , recherche sur les filtres à lait ($n = 1$) Durée de cette surveillance : 3 mois Si résultat STEC positif : exclusion des tanks de la ferme sur 10 jours de la collecte pour la filière lait cru et début d'une nouvelle période de surveillance renforcée (3 mois)

- **Cas de *Salmonella***

Pour *Salmonella*, et conformément aux recommandations du premier avis (Anses, 2022), le GT FALC2 a retenu des mesures générales applicables à tous les sérovars et des mesures spécifiques à la filière bovine pour *Salmonella* Dublin. Les mesures sélectionnées relèvent de trois catégories : (i) gestion du troupeau (gestion des cas cliniques, limitation de l'introduction d'animaux porteurs, réforme des excréteurs), (ii) conditions d'hébergement (hygiène des locaux, zones dédiées) et (iii) hygiène de la traite.

La vaccination n'a pas été retenue car elle ne prévient pas totalement l'excration fécale et interfère avec la sérologie de suivi.

La Figure 2 et le Tableau 3 recensent l'ensemble des mesures de maîtrise et de surveillance liées à *Salmonella* spp. et *S. Dublin*.

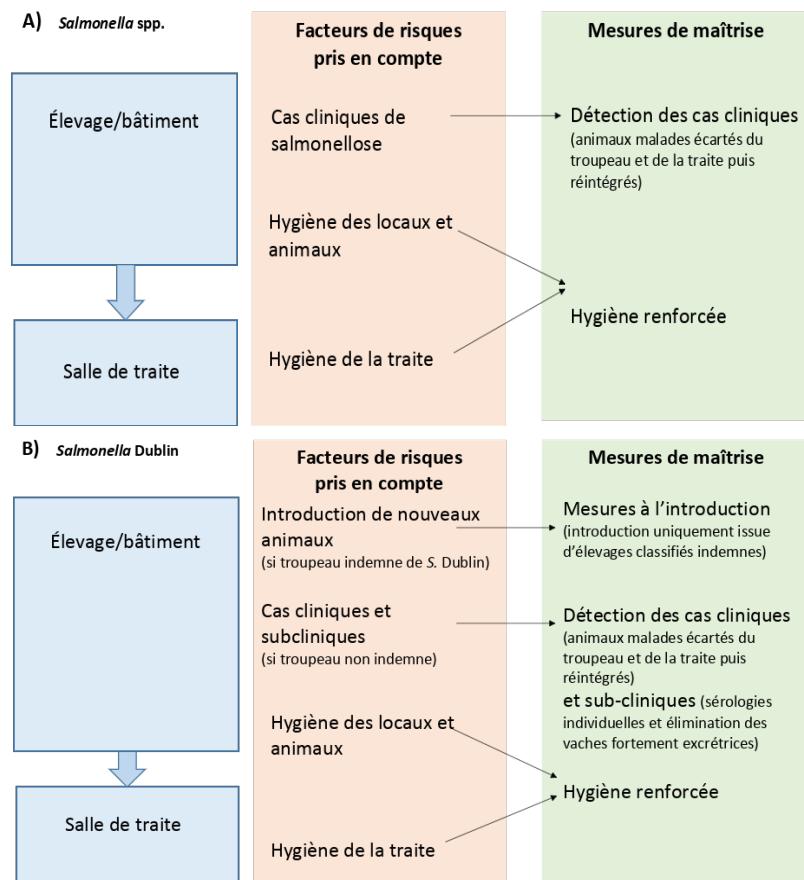


Figure 2 : Synthèse des facteurs de risque pour *Salmonella* spp. (A) et *Salmonella* Dublin (B) au stade de la ferme et mesures de maîtrise correspondantes

Tableau 3 : Surveillance de *Salmonella* dans les élevages. Synthèse des pratiques actuelles et des scénarios à tester pour les fermes dont le lait est collecté par des entreprises

Stade de la surveillance	Cible bactériologique	Pratiques actuelles	Scénario de base	Scénarios à tester
Animaux	<i>Salmonella</i> Dublin	Pas de surveillance	Pratiques actuelles	Troupeaux non indemnes : recherche individuelle de la bactérie (trimestrielle) et réforme des vaches fortement excrétrices
	<i>Salmonella</i> (salmonellose clinique)	Surveillance quotidienne des animaux et exclusion de l'animal de la traite si symptômes	Pratiques actuelles	La détection de cas cliniques déclenche une surveillance renforcée des laits (tanks, citerne)
Troupeaux	<i>Salmonella</i> Dublin	Pas de connaissance du statut des troupeaux	Pratiques actuelles	Surveillance trimestrielle des tanks (sérologie) issus de tous les troupeaux (classification indemne/non indemne)
				Troupeaux indemnes : pas d'import d'animaux provenant de fermes non-indemnes
Lait à la ferme	<i>Salmonella</i> spp.	Pas de recherche en routine	Pratiques actuelles	<u>Recherche si dépassement du critère <i>E. coli</i> :</u> Recherche de <i>Salmonella</i> dans le lait de tank (n = 1) Recherche sur les filtres à lait

				Durée de cette surveillance : 3 mois (recherche réalisée en même temps que les prélèvements pour dénombrement de <i>E. coli</i>) Si <i>Salmonella</i> positif : exclusion des tanks de la filière lait cru sur 10 jours et début d'une nouvelle période de surveillance renforcée (3 mois)
--	--	--	--	--

- **Cas de *L. monocytogenes***

Pour *Listeria monocytogenes*, les mesures de maîtrise retenues par le GT FALC2 relèvent de trois catégories : (i) gestion des animaux (dépistage des mammites subcliniques), (ii) alimentation (qualité des ensilages/enrubannages) et (iii) hygiène de la traite et des équipements (Figure 3). Les mammites subcliniques à *L. monocytogenes* constituent une source documentée de contamination du lait, tandis que les mauvaises pratiques de gestion des fourrages et l'inefficacité du nettoyage des équipements de traite peuvent favoriser la persistance de la bactérie dans l'environnement des fermes.

En matière de surveillance (Tableau 4), les pratiques actuelles sont variables en fonction des filières. Les scénarios à tester incluent une détection systématique des mammites subcliniques et une recherche régulière de *L. monocytogenes* dans les filtres à lait, avec exclusion temporaire des tanks positifs.

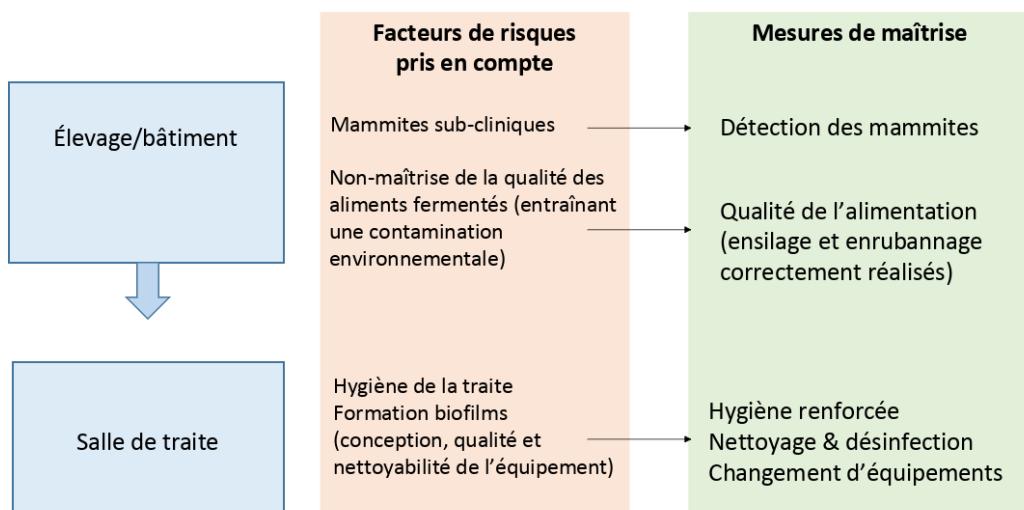


Figure 3 : Synthèse des facteurs de risque pour *L. monocytogenes* au stade de la ferme et mesures de maîtrise correspondantes

Tableau 4 : Surveillance de *L. monocytogenes* dans les élevages. Synthèse des pratiques actuelles et des scénarios à tester pour les fermes dont le lait est collecté par des entreprises

Stade de la surveillance	Pratiques actuelles	Scénario de base*	Scénarios à tester
Animaux	Surveillance indirecte sur mammites subcliniques	Pratiques actuelles	Surveillance stricte conduisant à la détection systématique des mammites à <i>L. monocytogenes</i>
Lait à la ferme	Pratiques variables selon les filières, les entreprises	Pas de recherche	Recherche de <i>L. monocytogenes</i> trimestrielle (filtre) Si positif : exclusion des laits de la ferme de la filière lait cru. Réintroduction si l'analyse suivante est conforme

3.2.2. Mesures de maîtrise et de surveillance pendant la transformation fromagère pour les trois pathogènes considérés

Pour la fabrication fromagère, les mesures de maîtrise retenues concernent principalement : (i) le choix des fermentations acidifiantes et le respect des cinétiques d'acidification, (ii) la conduite de l'affinage (maîtrise des recontaminations, utilisation de souches productrices de molécules inhibitrices, durée d'affinage) et (iii) les bonnes pratiques d'hygiène dans les ateliers (Figure 4).

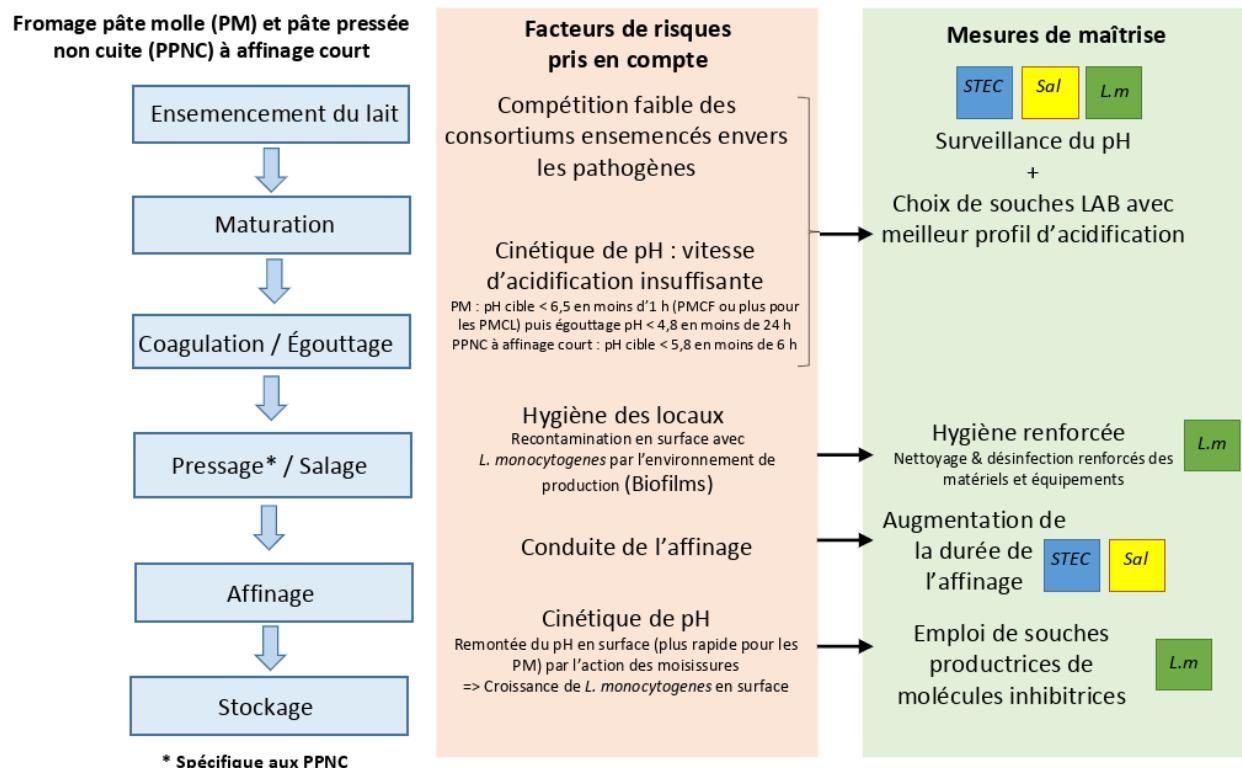


Figure 4 : Synthèse des facteurs de risque et des mesures de maîtrise correspondantes pour la fabrication des fromages à pâte molle et à pâte pressée non cuite à affinage court

(légende : PM : pâte molle (à croûte fleurie ou à croûte lavée) ; PPNC : pâte pressée non cuite ; Sal : *Salmonella*, L.m : *L. monocytogenes*) LAB : bactéries lactiques

En matière de surveillance microbiologique, les pratiques actuelles reposent sur les autocontrôles réalisés par les exploitants (Tableau 5). Le scénario de base considère une recherche non systématique des agents pathogènes, et les scénarios testés par le GT portent sur une généralisation et un renforcement des fréquences des analyses sur les lots, avec des adaptations entre productions industrielles et fermières. Un accent particulier est mis sur le renforcement du critère d'hygiène *E. coli*, avec un abaissement de la valeur seuil (de 50 à 10 ufc/mL) pour ce paramètre pour la filière industrielle et l'instauration d'une surveillance à la ferme (cf 3.2.2.1 du rapport).

Tableau 5 : Scénarios de surveillance microbiologique dans le cadre de la transformation fermière ou industrielle

Stade de la surveillance	Cible bactériologique	Pratiques actuelles	Scénario de base	Scénarios à tester
Lait mis en production fromagère	<i>E. coli</i> (critère d'hygiène)	Fromage fermier : pas ou peu de surveillance Fromage industriel : quantification systématique. Exclusion du lait de tank concerné par le dépassement de la valeur seuil (50 ufc/ml)	Fermier : pas de surveillance Industriel : pratiques actuelles	Fermier : Surveillance <i>E. coli</i> tous les 10 jours (seuil 50 ufc/ml) Industriel : Abaissement du seuil (10 ufc/ml)
	STEC	Pas de recherche en routine	Pratiques actuelles	Recherche dans le lait n=1 tous les lots Recherche sur les filtres à lait n = 1 tous les lots Si résultat STEC positif : orientation du lot de lait vers d'autres productions
	<i>Salmonella</i>	Les pratiques sont variables en fonction des entreprises et des types de fromages	Pas de recherche	Recherche dans le lait Recherche sur les filtres n = 1 tous les lots Si présence de <i>Salmonella</i> : orientation du lot de lait vers d'autres productions
	<i>L. monocytogenes</i>	Les pratiques sont variables en fonction des entreprises et des types de fromages	Pas de recherche	Recherche dans le lait Recherche sur les filtres n = 1 tous les lots Si présence de <i>L. monocytogenes</i> : orientation du lot de lait vers d'autres productions
	STEC	Une partie des entreprises font une recherche (enquête plateforme SCA 60 % ³⁾	60 % des entreprises : n = 1 systématique 40 % des entreprises : n = 0	Scenario #1 % entreprise : 100% % lot : 100% n = 1 Scenario #2 % entreprise : 100 % % lot : 100 % n = 5
	<i>Salmonella</i>	Les pratiques sont variables en fonction des entreprises et des types de fromages	% entreprise : 100 % % lot : 50% N = 5	Scenario #1 % entreprise : 100% % lot : 100% n = 1 Scenario #2 % entreprise : 100% % lot : 100% n = 2
	<i>L. monocytogenes</i>	Les pratiques sont variables en fonction des entreprises et des types de fromages	% entreprise : 100 % % lot : 50% n = 5 en fin d'affinage	Scenario #1 % entreprise : 100 % % lot : 100 % n = 5 en fin d'affinage

* ufc : unité formant colonie

³ <https://www.plateforme-sca.fr/page/surveillance-de-stec-en-filiere-de-fabrication-de-fromages-au-lait-cru>

3.2.3. Mesures de maîtrise en lien avec les consommateurs

Pour les consommateurs, les mesures retenues par le GT FALC2 (Anses, 2022) se répartissent en deux catégories : (i) mesures d'éviction de consommation pour les populations sensibles et (ii) mesures générales d'hygiène.

Les mesures d'éviction concernent : la recommandation d'éviter la consommation de fromages au lait cru pour les enfants (seuils d'âge testés : <3 ans, <5 ans ou <10 ans), pour les femmes enceintes, et pour les personnes âgées de plus de 65 ans, immunodéprimées ou atteintes de maladies chroniques. Les mesures générales d'hygiène portent sur le respect des températures de réfrigération (scénarios testés : température inférieure à 4 °C et inférieure à 8 °C) et sur la prise en compte des pratiques de consommation au-delà des durées de vie fixées par le fabricant.

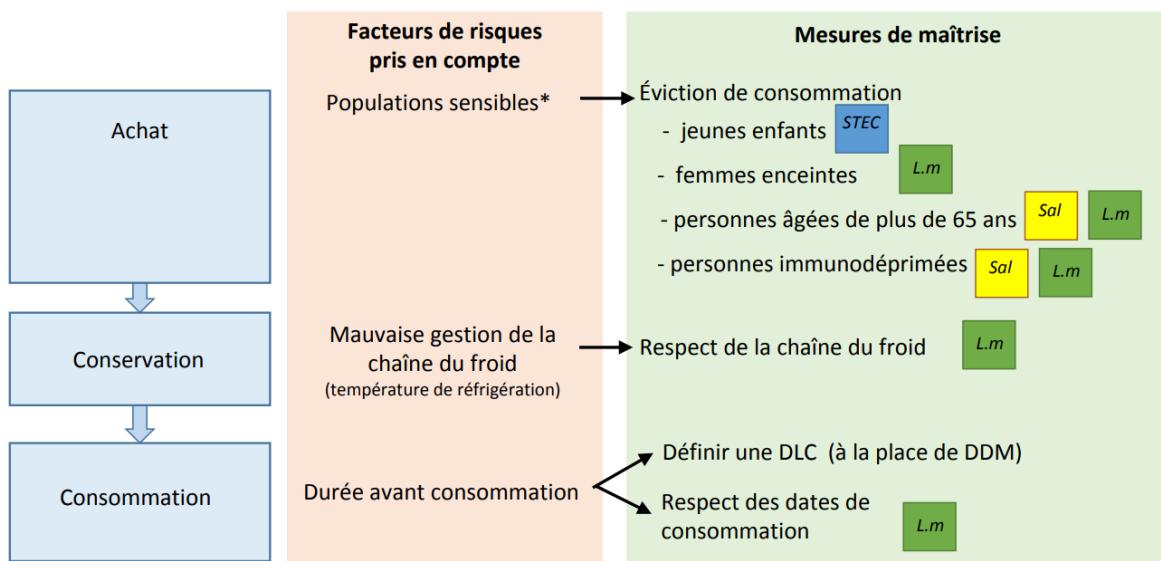


Figure 5 Synthèse des facteurs de risque et des mesures de maîtrise retenues au stade de la consommation. *Sont considérés comme populations sensibles (d'après Anses, 2022) : les nourrissons et les jeunes enfants, les femmes enceintes, les personnes âgées, les personnes immunodéprimées ou atteintes de certaines maladies chroniques. (Légende : Sal : *Salmonella*, L.m : *L. monocytogenes*) DLC : date limite de consommation, DDM : date de durabilité minimale.

3.3. Sorties du modèle du scénario de base et analyse d'incertitude

3.3.1. Analyse des résultats du scénario de base

Le Tableau 6 présente le risque moyen associé à la consommation de fromages au lait cru, exprimé par portion, en nombre de cas annuels et en nombre de cas graves (dont décès), pour les différentes combinaisons danger/fromage/espèce animale. Les résultats sont fournis en médianes avec intervalles de confiance à 95 %, reflétant les incertitudes associées.

Concernant les STEC : le modèle estime environ le nombre médian de 235 cas annuels de SHU dus aux fromages au lait cru (tous fromages confondus), dont 79 % chez les enfants. Ce nombre est proche des données de la surveillance épidémiologique des SHU (qui recense les cas liés à une transmission alimentaire ou via d'autres sources) (Anses 2023) et traduit probablement une surestimation, liée au modèle dose-réponse fondé sur une unique souche O157:H7 et ne prenant pas en compte les facteurs liés à l'hôte. Le modèle sous-estime par ailleurs le risque chez les très jeunes enfants (<3 ans), ce qui nécessitera une vigilance dans l'interprétation des mesures d'éviction testées.

Concernant *Salmonella* : le modèle estime environ 49 000 cas annuels attribués aux fromages au lait cru (tous fromages confondus), soit près de 27 % des salmonelloses alimentaires en France, dont 1 000 cas graves et 17 décès. Ces résultats sont cohérents avec les estimations de Santé Publique France, même si la répartition entre types de fromages diffère légèrement des données épidémiologiques (Anses, 2022).

Concernant *Listeria monocytogenes* : le modèle estime à 50 le nombre de cas annuels de listériose liés aux fromages au lait cru (tous fromages confondus), en accord avec l'ordre de grandeur des cas nationaux (400–500 par an toutes sources confondues). La majorité des cas concernent les personnes âgées de plus de 65 ans, suivis des personnes immunodéprimées et, dans une moindre mesure, des femmes enceintes. Les fromages à pâte molle représentent la principale source.

Tableau 6 : Médiane et intervalle d'incertitude à 95% du risque moyen pour le scénario de base pour les productions fermières et industrielles (Légende : *Salm* : *Salmonella*, *Lm* : *L. monocytogenes* ; *Prod.* : production *I* : Industriel ; *F* : Fermier)

Combinaisons		Prod.	Risque par portion			Nombre de cas annuels			Nombre de cas annuels graves			dont décès			
			Médiane	IC2,5%	IC 97,5	Médiane	IC2,5%	IC 97,5	Médiane	IC2,5%	IC 97,5	Médiane	IC2,5%	IC 97,5	
Fromage	Danger														
PMCF bovin	STEC	I	1,7E-05	6,4E-08	7,2E-05	4504	17	19228	95	0	404	1	0	4	
		F	1,8E-05	6,8E-08	7,4E-05	330	1	1382	7	0	29	0	0	0	
PMCF caprin		I	8,4E-07	6,7E-10	7,1E-05	147	0	12414	3	0	261	0	0	3	
		F	7,6E-07	6,6E-10	7,0E-05	10	0	918	0	0	19	0	0	0	
PPNCC bovin		I	9,8E-06	4,2E-07	2,2E-05	5144	221	11601	108	5	244	1	0	3	
		F	1,1E-05	4,3E-07	2,3E-05	426	17	929	9	0	20	0	0	0	
PPNCC ovin		I	9,7E-06	2,5E-07	4,5E-05	548	14	2563	12	0	54	0	0	1	
		F	9,1E-06	2,3E-07	4,4E-05	36	1	172	1	0	4	0	0	0	
PMCF bovin	<i>Salm.</i>	I	6,9E-05	1,0E-05	3,8E-04	18296	2655	101800	384	56	2138	7	1	36	
		F	7,7E-05	1,0E-05	3,7E-04	1429	191	6963	30	4	146	1	0	2	
PMCF caprin		I	1,4E-04	1,3E-05	7,1E-04	25420	2258	125041	534	47	2626	9	1	45	
		F	1,3E-04	1,2E-05	7,9E-04	1739	159	10376	37	3	218	1	0	4	
PPNCC bovin		I	3,4E-06	3,7E-07	4,3E-05	1793	195	22674	38	4	476	1	0	8	
		F	3,3E-06	3,7E-07	4,7E-05	132	15	1867	3	0	39	0	0	1	
PMCF bovin	<i>Lm</i>	I	6,3E-08	7,7E-10	1,3E-06	17	0	342	17	0	342	3	0	68	
		F	6,8E-08	7,5E-10	1,3E-06	1	0	24	1	0	24	0	0	5	
PMCF caprin		I	8,0E-08	1,2E-10	9,7E-07	14	0	171	14	0	171	3	0	34	
		F	8,7E-08	1,3E-10	9,9E-07	1	0	13	1	0	13	0	0	3	
PMCL bovin		I	2,2E-07	3,4E-09	1,2E-06	7	0	67	7	0	67	1	0	13	
		F	6,8E-08	7,5E-10	1,3E-06	1	0	24	1	0	24	0	0	5	
PPNCC bovin		I	8,9E-09	7,7E-11	7,9E-08	5	0	42	5	0	42	1	0	8	
		F	9,1E-06	2,3E-07	4,4E-05	36	1	172	1	0	4	0	0	0	

De façon générale, les sorties du modèle sont du même ordre de grandeur que les données épidémiologiques. Cela ne signifie toutefois pas que le modèle soit formellement validé : d'autres formulations ou systèmes d'équations pourraient conduire à des résultats similaires. Le modèle reste toutefois pertinent pour évaluer l'impact de mesures de maîtrise, ce pourquoi il a été développé. Les estimations du risque et du nombre de cas s'accompagnent d'intervalles d'incertitude assez larges, liés aux sources de variabilité et aux hypothèses de modélisation. Ces résultats doivent donc être interprétés avec prudence ; en particulier concernant l'éviction de consommation pour les enfants de moins de trois ans. En effet, le modèle n'est pas précis sur cette classe d'âge, du fait du manque de données de consommation. L'interprétation de cette mesure d'éviction nécessitera donc une attention particulière, son effet pouvant être masqué par cette sous-estimation du risque.

3.3.2. Bilan de l'analyse d'incertitude

Le GT FALC2 a conduit une analyse quantitative des incertitudes afin d'identifier l'impact des paramètres d'entrée du modèle sur la précision des estimations de risque. Cette analyse, basée sur des simulations de Monte Carlo et des lois de distribution définies selon les données disponibles, a permis de hiérarchiser les sources d'incertitude et d'établir la liste des données prioritaires à acquérir pour renforcer le modèle.

En complément, une analyse qualitative a été menée selon la méthode ACCMER (Anses, 2023). Elle a permis d'identifier les limites liées au cadrage de l'expertise (périmètre restreint aux fromages au lait cru et à 11 combinaisons danger/fromage/espèce animale), aux simplifications opérées dans les modules « ferme » et « transformation », à l'extrapolation de données entre espèces animales, aux pratiques de consommation ou encore aux relations dose-réponse.

Ces travaux d'analyse d'incertitude, dont le bilan est présenté en 3.5.1, contribuent directement à la réponse à la question A6, en permettant de cibler les incertitudes les plus influentes et de formuler des recommandations pour orienter les futures recherches et améliorer la robustesse des évaluations.

3.4. Efficacité des mesures de maîtrise (question A3) et de surveillance (question A5)

Cette section évalue l'effet des mesures les plus efficaces par module (ferme, fabrication, consommation), puis par agent pathogène et type de fromage. Il est important de rappeler que les mesures relevant du module ferme ou du module fabrication sont des mesures qui viennent renforcer ou compléter les mesures déjà mises en place par les opérateurs (voir scénario de base), mesures qui en tant que telles ont déjà une efficacité avérée. Les mesures relevant du module de la consommation sont destinées à être appliquées par les consommateurs, dans le but de contribuer à la réduction du risque lié à la contamination des fromages au lait cru. Certaines sont déjà en partie respectées par les consommateurs. Les scénarios testent leur application par la totalité des populations concernées. Cependant, ces recommandations ne doivent pas être considérées comme la seule barrière assurant la protection du consommateur. Elles ne se substituent pas aux obligations des opérateurs, premiers responsables de la sécurité sanitaire des aliments selon le règlement (CE) n°178/2002 et l'article L. 412-1 du Code de la consommation.

Pour les productions fermières, deux mesures supplémentaires ont été simulées dans le cadre de ce travail. Leurs résultats sont présentés séparément dans la section 3.4.4.

3.4.1. Impact global des mesures par module (tous les agents pathogènes et tous les fromages)

Afin d'évaluer l'impact combiné des mesures de maîtrise et de surveillance, le GT a testé leur application module par module, en considérant successivement les interventions possibles à la ferme, lors de la fabrication et au niveau du consommateur. Pour chaque combinaison danger/fromage/espèce animale, le GT a retenu comme indicateur principal le nombre médian de cas graves annuels, en cohérence avec les analyses détaillées dans la partie 3.3.1. En complément, une synthèse portant sur tous les fromages a été produite, permettant d'apprécier la composition du risque global selon les types de fromages.

La Figure 6 présente les résultats des différentes mesures pour les STEC. Les résultats montrent que les trois niveaux d'intervention - à la ferme, lors de la fabrication, et au moment de la consommation - permettent une réduction significative du risque.

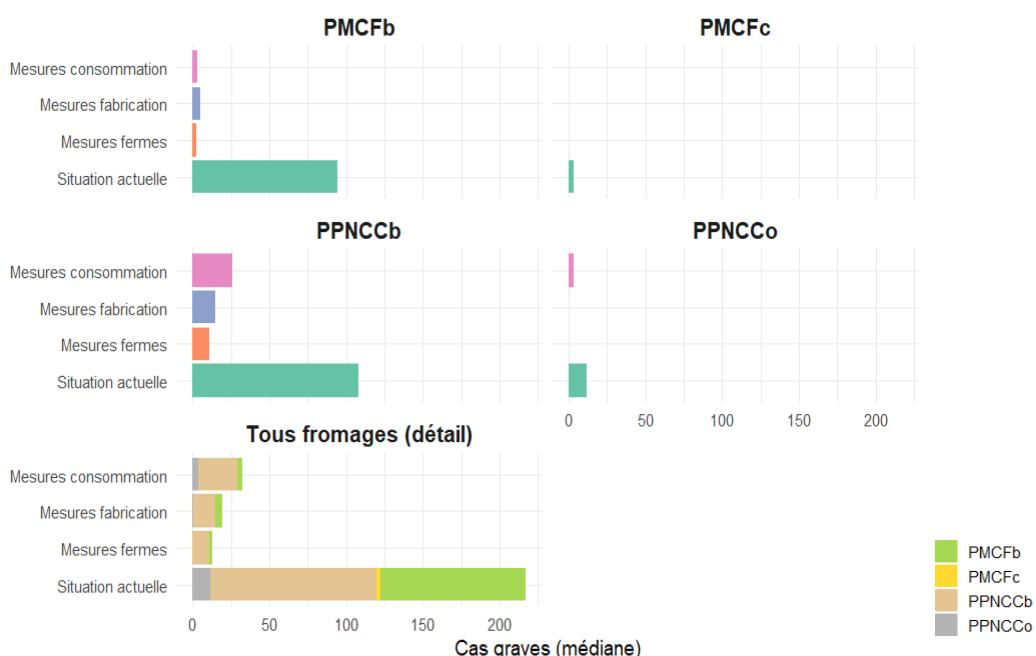


Figure 6 : Nombre de cas graves d'infection à STEC prédicts par les modèles AQR, pour la situation actuelle et pour la situation où l'ensemble des mesures de maîtrise et de surveillance seraient appliquées à chacun des trois stades (à la ferme, à la fabrication, chez le consommateur) (Légende : [PMCF] pâte molle à croûte fleurie, [PPNCC] pâte pressée non cuite à affinage court, suivi de la lettre mentionnant l'espèce : b pour bovine, o pour ovine et c pour caprine).

Dans le cas de *Salmonella* (Figure 7), les mesures au stade de la fabrication (mesures de maîtrise et surveillance) sont les plus efficaces, et ce, quel que soit le type de fromage. Les mesures mises en place à la ferme présentent une efficacité variable : elles sont plus efficaces pour les fromages à PPNCCb en raison d'une prévalence plus élevée de *Salmonella* Dublin dans les exploitations produisant ces fromages. En revanche, l'effet des mesures appliquées par les consommateurs apparaît limité, notamment parce que celles-ci se limitent essentiellement à la non-consommation de la croûte des fromages (dans le modèle, l'évitement de consommation pour les personnes de plus de 65 ans se traduit par un impact sur le nombre de décès, les cas graves étant jugés indépendants des catégories de population).

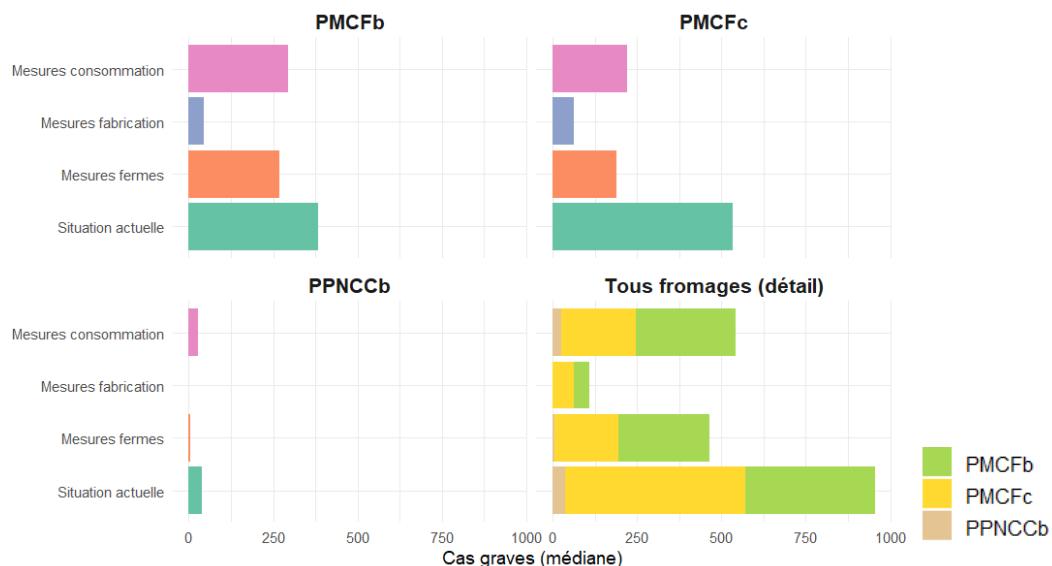


Figure 7 : Nombre de cas graves de salmonellose prédicts par les modèles AQR, pour la situation actuelle et pour la situation où l'ensemble des mesures de maîtrise et de surveillance seraient appliquées à chacun des trois stades. (Légende : [PMCF] pâte molle à croûte fleurie, [PPNCC] pâte pressée non cuite à affinage court, suivi de la lettre mentionnant l'espèce : b pour bovine et c pour caprine).

Pour *L. monocytogenes* (Figure 8), le modèle montre que, dans les configurations où les recommandations sont strictement appliquées au stade de la consommation — notamment l'éviction de consommation pour les populations sensibles et la maîtrise de la température de réfrigération — le risque peut devenir extrêmement faible, sous réserve de l'adhésion complète des consommateurs. Les mesures mises en œuvre au stade de la fabrication peuvent également entraîner une réduction importante du niveau de risque. En revanche, les mesures appliquées à la ferme ont un impact plus limité sur le risque estimé.

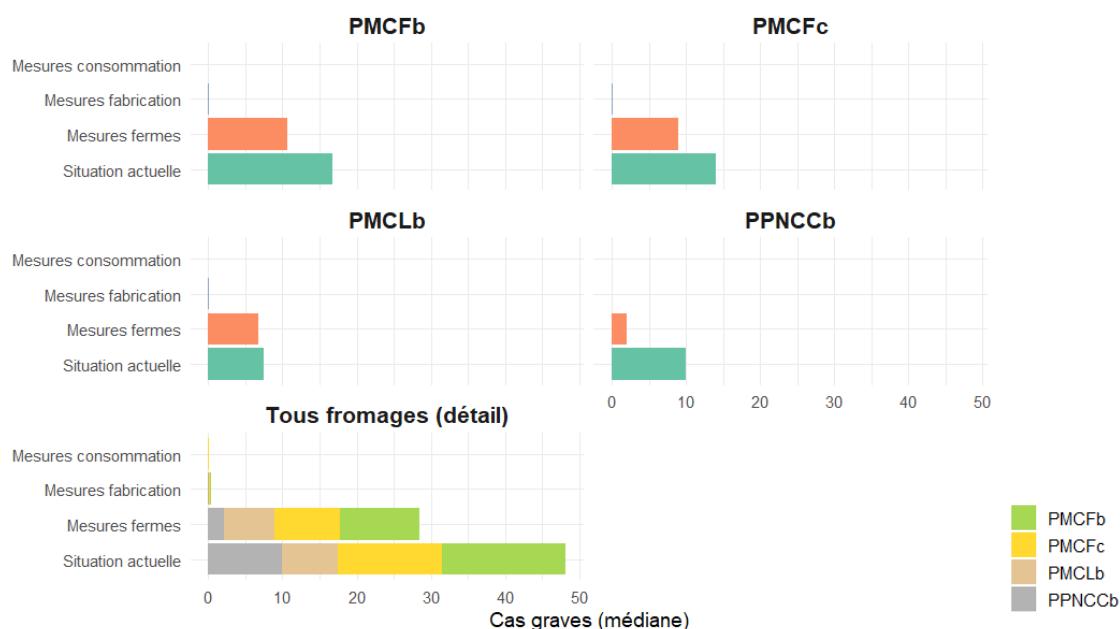


Figure 8 : Nombre de cas graves de listériose prédicts par les modèles AQR, pour la situation actuelle et pour la situation où l'ensemble des mesures de maîtrise et de surveillance seraient appliquées à chacun des trois stades. (Légende : [PMCF] pâte molle à croûte fleurie, [PMCL] pâte molle à croûte lavée, [PPNCC] pâte pressée non cuite à affinage court, suivi de la lettre mentionnant l'espèce : b pour bovine et c pour caprine).

3.4.2. Effet par microorganisme pathogène et par type de fromage, des mesures individuelles les plus efficaces

Les figures ci-dessous présentent l'effet de mesures prises individuellement parmi l'ensemble des interventions testées dans le modèle. L'analyse porte uniquement sur les mesures jugées les plus efficaces pour réduire le nombre de cas graves.

La figure 9 illustre l'impact de ces mesures sur les quatre types de fromages concernés par les cas graves liés aux STEC.

Pour les STEC, la mesure la plus efficace identifiée est la recherche systématique sur 100 % des lots avec un plan d'échantillonnage $n = 5$, qui permettrait une réduction très importante du nombre annuel de cas graves. Les estimations passent ainsi de 95 à 6 cas pour les PMCFb, de 3 à 0 cas pour les PMCFc, de 108 à 32 cas pour les PPNCCb et de 12 à 5 cas pour les PPNCCo. L'éviction des troupeaux porteurs de STEC du sérotype O26:H11 (groupe I) présente également un effet particulièrement marqué, avec une réduction proche de 98 % pour les PMCFb (de 95 à 2 cas) et de 93 % pour les PPNCCb (de 108 à 8 cas). L'éviction de consommation chez les enfants de moins de 10 ans permettrait, quant à elle, de réduire l'incidence estimée d'environ 75 %. Enfin, deux autres mesures montrent des effets notables et relativement comparables : l'acidification rapide du lait, qui permet de diviser par deux le nombre de cas, et l'exclusion des lots de lait cru présentant une concentration en indicateurs *E. coli* supérieure à 10 ufc/mL.

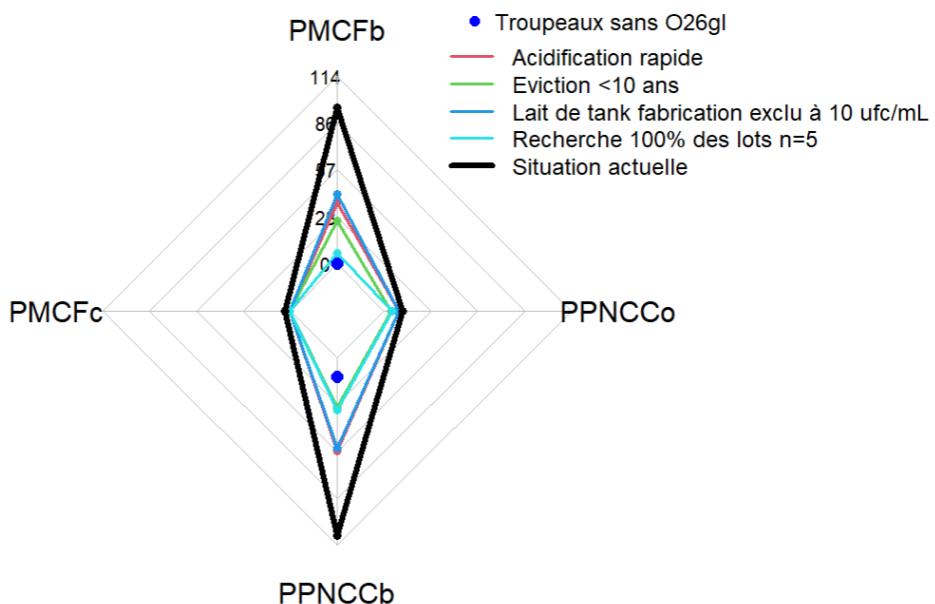


Figure 9 : Nombre de cas graves liés aux STEC estimés selon différents scénarios d'intervention, pour quatre types de fromage. (Légende : [PMCF] pâte molle à croûte fleurie, [PPNCC] pâte pressée non cuite à affinage court, suivi de la lettre mentionnant l'espèce : b pour bovine, o pour ovine et c pour caprine).

La Figure 10 illustre les effets de plusieurs mesures individuelles visant à réduire les cas graves de salmonellose liés à trois types de fromage.

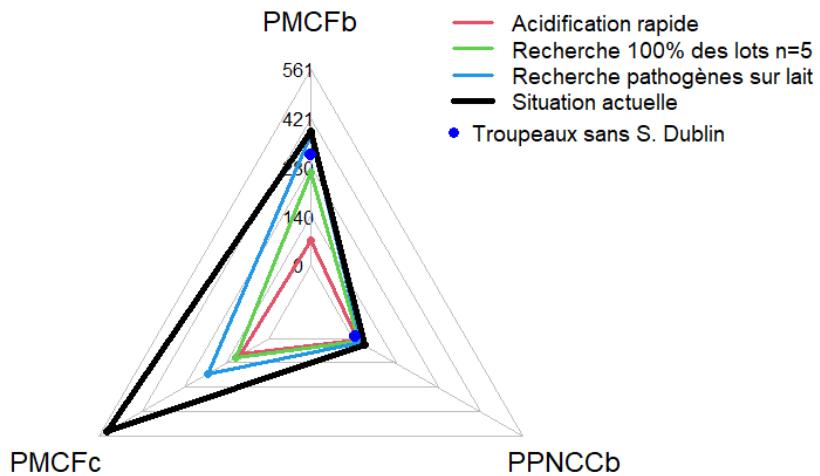


Figure 10 : Nombre de cas graves de salmonellose estimés selon différents scénarios d'intervention, pour trois types de fromage. (Légende : [PMCF] pâte molle à croûte fleurie, [PPNCC] pâte pressée non cuite à affinage court, suivi de la lettre mentionnant l'espèce : b pour bovine et c pour caprine).

Pour *Salmonella*, l'éviction des troupeaux porteurs de *S. Dublin* constitue la mesure la plus marquante, avec une réduction très importante du nombre annuel de cas pour les PPNCCb, passant de 38 à 3, et un effet plus modéré pour les PMCFb, où les cas diminueraient de 384 à 318. Cette différence reflète la plus forte prévalence de *S. Dublin* dans les élevages bovins à l'origine des PPNCC. Les mesures appliquées au stade de la fabrication se révèlent également très efficaces. L'acidification rapide du lait permettrait une réduction nette, avec des cas ramenés à 72 pour les PMCFb et à 12 pour les PPNCCb. Un allongement de la durée d'affinage produirait un effet similaire, bien qu'il ne soit pas retenu par le GT en raison de son impact défavorable sur le risque de listériose. Enfin, les stratégies de recherche de *Salmonella* dans le lait ou dans les fromages au pic de contamination apparaissent aussi bénéfiques, mais leur effet demeure plus limité comparativement aux autres mesures.

La figure 11 présente l'effet des mesures les plus efficaces retenues par les experts pour réduire le nombre de cas graves de listériose selon le type de fromage.

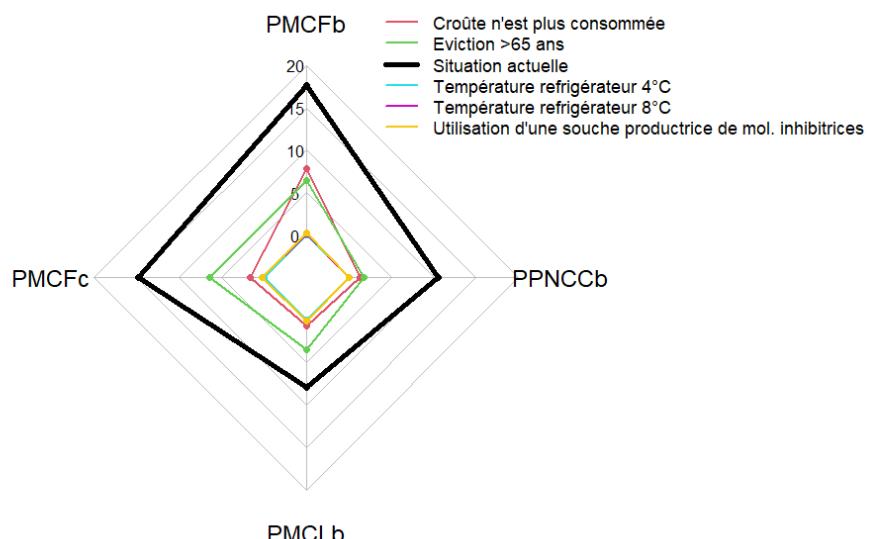


Figure 11 : Nombre de cas graves de listérioses estimés selon différents scénarios d'intervention, pour quatre types de fromage. (Légende : [PMCF] pâte molle à croûte fleurie, [PMCL] pâte molle à croûte lavée. [PPNCC] pâte pressée non cuite à affinage court, suivi de la lettre mentionnant l'espèce : b pour bovine et c pour caprine).

Pour *L. monocytogenes*, les cas graves concernent principalement les fromages à pâte molle au lait cru, avec 17 cas pour les PMCFb et 14 cas pour les PMCFc, contre 7 et 10 cas pour les PMCLb et les PPNCCb respectivement. Certaines mesures se distinguent par leur efficacité majeure, il s'agit (i) de l'utilisation d'une souche productrice de molécules inhibitrices pendant l'affinage, qui permettrait de réduire le nombre de cas à moins d'un par an pour les PMCFb et les PPNCCb, ainsi que (ii) du maintien strict des températures de réfrigération en dessous de 4 °C ou de 8 °C au niveau domestique, qui conduirait également à un risque quasi nul. L'éviction de consommation pour les personnes de plus de 65 ans entraînerait une réduction substantielle de 31 cas, tandis que la non-consommation de la croûte pour l'ensemble de la consommation permettrait de diviser environ par cinq l'incidence, avec un effet particulièrement marqué pour les PMCLb et les PPNCCb. Enfin, la limitation stricte de la durée de conservation à domicile à quatre semaines réduirait aussi le risque de listériose, mais cette mesure n'a pas été retenue en raison de son impact défavorable sur le risque lié à *Salmonella* et aux STEC.

3.4.3. Effet de la combinaison de mesures individuelles (illustré à partir des mesures efficaces sur les STEC dans le cas des PMCF au lait cru de bovins)

L'évaluation de l'effet combiné de différentes mesures de maîtrise a été réalisée par le GT FALC2 en prenant l'exemple des STEC dans le cas des PMCF au lait cru de bovins. Les combinaisons deux à deux montrent que leur efficacité ne s'additionne pas simplement. Les résultats suggèrent un fonctionnement de type multiplicatif (mais pas systématiquement), chaque mesure agissant successivement sur les cas résiduels non évités par la précédente.

Toute évaluation de combinaisons de mesures de maîtrise particulières doit nécessairement passer par des simulations du modèle d'évaluation des risques pour capturer ces interactions complexes. Une approche simplifiée consistant à additionner ou même à multiplier les effets individuels s'avère insuffisante pour prévoir avec précision l'efficacité réelle des combinaisons, particulièrement lorsque les mesures agissent sur des mécanismes biologiques distincts ou interfèrent entre elles. Au-delà de l'effet d'une mesure de maîtrise sur un agent pathogène donné, il est important de mesurer également son effet sur les autres agents pathogènes.

3.4.4. Efficacité des mesures de maîtrise en production fermière

Dans le cas particulier des productions fermières, deux mesures de maîtrise spécifiques ont été analysées : la surveillance du critère d'hygiène *E. coli* et le suivi du pH des lots de fromage. La première repose sur la réalisation régulière d'analyses du critère d'hygiène dans le lait cru et sur l'arrêt temporaire de la production de fromages en cas de dépassement du seuil défini. La seconde consiste à écarter systématiquement les lots présentant un défaut d'acidification, compte tenu du risque de développement des bactéries pathogènes. Bien que ces mesures contribuent à renforcer la maîtrise sanitaire en contexte fermier, leur effet global sur la réduction du risque reste limité par rapport à d'autres interventions identifiées dans le cadre de l'évaluation. Elles doivent donc être envisagées comme des mesures complémentaires, venant s'ajouter aux pratiques déjà mises en place par les producteurs.

3.5. Recommandations de recherche (question A6)

Toutes les recommandations proposées ci-après reposent sur les modèles d'appréciation du risque développés dans le cadre de cette saisine. Elles s'appuient sur la comparaison entre le scénario de base (qui reflète les pratiques actuelles chez les producteurs de lait, les transformateurs et les consommateurs) et des scénarios d'amélioration. Elles concernent les

productions fermières et industrielles. Bien que toutes les mesures déjà incluses dans le scénario de base soient pertinentes, elles ne font pas l'objet de recommandations de recherche spécifiques, même si les experts du GT rappellent qu'à ce jour, elles ne sont pas toutes systématiquement appliquées par les professionnels. En effet, l'objet de cette section est (i) de présenter des recommandations de recherche associées au modèle développé en lien avec les mesures testées dans les scénarios, ainsi que (ii) d'explorer de nouveaux leviers d'action.

Le GT propose ci-dessous des travaux qui peuvent s'organiser selon trois axes complémentaires. Le premier concerne l'acquisition de nouvelles données afin de réduire les incertitudes du modèle. Le deuxième axe vise à accompagner la mise en œuvre des mesures de maîtrise identifiées comme les plus efficaces, en précisant les conditions de leur déploiement, leur faisabilité et leur acceptabilité par les acteurs de la filière. Le troisième axe propose des pistes de recherche à plus long terme pour explorer de nouveaux leviers d'action, mieux comprendre les interactions biologiques en jeu et adapter les approches de modélisation aux spécificités des produits au lait cru.

3.5.1. Quelles données pour améliorer la précision des résultats du modèle ?

L'analyse des incertitudes a montré que plusieurs paramètres clés du modèle sont encore insuffisamment documentés. Au niveau de la ferme, il est nécessaire d'acquérir des données plus précises sur la prévalence et les niveaux de portage de STEC et de *Salmonella* chez les bovins, ovins et caprins, notamment la proportion de souches O26:H11 et du groupe I pour les STEC, ainsi que la proportion de souches hautement virulentes pour *Salmonella*. Des données quantitatives sur la charge en *Salmonella* dans les matières fécales et sur la fréquence/intensité d'excrétion d'*E. coli* et de STEC seraient également essentielles, tout comme des informations actualisées sur la prévalence de *L. monocytogenes* dans le lait de tank. Les facteurs de risque liés aux pratiques de traite et d'hygiène doivent aussi être mieux caractérisés.

Au niveau de la fabrication, la priorité est de documenter expérimentalement, *via* des challenge-tests ou des tests de vieillissement, l'inactivation et la croissance des pathogènes dans les fromages, afin de réduire l'incertitude sur les paramètres liés à l'affinage et au salage. Une meilleure quantification du taux de recontamination par *L. monocytogenes* est également nécessaire, ainsi que la répartition des pathogènes entre caillé et lactosérum.

Enfin, au stade de la consommation, l'amélioration du modèle suppose d'affiner la connaissance des pratiques réelles des consommateurs, notamment chez les populations sensibles. Les données actuelles, issues principalement d'enquêtes déclaratives, comportent des biais et ne permettent pas de distinguer les consommateurs réguliers des occasionnels, ni de caractériser les pratiques spécifiques à chaque type de fromage (mode de conservation, circuits d'achat, quantités consommées). Une meilleure définition de la consommation infantile, en particulier chez les enfants de certaines classes d'âge (< 5 ans), est également nécessaire, car son manque de précision a conduit à sous-estimer l'efficacité de certaines mesures d'évitement dans le modèle actuel.

3.5.2. Recommandations à court et moyen termes liées aux mesures de maîtrise les plus efficaces

- Concevoir des actions à court ou moyen terme, au niveau de la ferme**

Pour rappel, au niveau de la ferme, il ressort des travaux menés par les experts que les mesures de maîtrise les plus efficaces concernant les dangers STEC et *Salmonella* sont

l'introduction de nouveaux animaux issus de troupeaux indemnes de STEC O26:H11 stx2a+ et/ou stx2d+ (groupe I) et l'introduction de nouveaux animaux indemnes de *Salmonella* Dublin. Leur efficacité est conditionnée à la disponibilité de méthodes spécifiques et sensibles permettant la détection de ces dangers chez les animaux.

Pour les STEC O26:H11 du groupe I, le statut « indemne » ou « non-indemne » des troupeaux d'origine des nouveaux animaux vis à vis de ces STEC peut être établi sur la base d'une surveillance réalisée à partir des filtres à lait des tanks au niveau de ces fermes (voir section 4.2.1.1.2 du rapport du GT). Les méthodes de détection utilisées en routine pour détecter les STEC O26:H11 dans les aliments (méthodes de référence ou méthodes alternatives validées) peuvent être utilisées pour réaliser cette surveillance à partir des filtres à lait. Une étude pourrait être réalisée afin de définir les modalités (par exemple la fréquence des analyses) et vérifier la faisabilité et l'efficacité de cette mesure de maîtrise.

Pour *Salmonella* Dublin, l'introduction de nouveaux animaux indemnes de cette bactérie pathogène (animaux issus de troupeaux indemnes ou testés individuellement) constitue également une mesure de maîtrise prometteuse à la ferme. Toutefois, la mise en œuvre de cette stratégie suppose l'existence d'un dispositif de surveillance fiable et opérationnel, permettant de garantir le statut sanitaire des troupeaux fournisseurs. Des travaux seraient nécessaires pour évaluer la faisabilité et l'efficacité de cette mesure dans différents contextes d'élevage (taille de troupeau, type de filière, organisation sanitaire régionale), en tenant compte notamment de la fréquence et des modalités de dépistage. Les expériences danoises ou anglaises permettent d'avoir de premières indications sur le déploiement d'une telle surveillance (cf. partie 3.1.2 du rapport).

La vaccination n'a pas été intégrée parmi les mesures testées, faute de données suffisantes pour en évaluer l'efficacité. Toutefois, le modèle a montré que disposer de troupeaux indemnes constitue un levier majeur de réduction du risque. Dans cette perspective, la vaccination pourrait représenter un moyen alternatif d'atteindre cet objectif. C'est pourquoi les experts du GT recommandent d'explorer, à titre de recherche, son efficacité potentielle et ses modalités de mise en œuvre en élevage.

Ces mesures (ou toutes mesures à appliquer à la ferme) ne peuvent être conduites en l'absence d'actions d'accompagnement des éleveurs. Concernant ces actions, il serait nécessaire de mener des études de deux ordres : (i) évaluer la pertinence des formations actuelles en vue de les améliorer si nécessaire, et, (ii) comprendre pourquoi l'ensemble de la profession n'applique pas toutes les mesures (y compris celles de base) :

(i) Vis à vis de la pertinence des formations, des études seraient nécessaires pour caractériser l'impact des actions de formation délivrées aux éleveurs et à leurs organismes de conseils sur la qualité du lait, en évaluant les programmes pédagogiques de sensibilisation des éleveurs aux risques microbiologiques et à l'importance des bonnes pratiques. Ceci est d'autant plus vrai pour les éleveurs novices dans la filière lait cru. En fonction des résultats obtenus, des améliorations pourraient être proposées pour ces formations, afin de renforcer la formation des éleveurs.

(ii) Vis à vis de la non-application des mesures de maîtrise par les éleveurs, des études socio-économiques portant sur les déterminants du comportement des éleveurs au regard de leur adhésion à l'application des mesures d'hygiène seraient nécessaires. Les résultats de ces études pourraient venir enrichir (sur le fond et la forme) des actions de formation délivrées aux éleveurs et à leurs organismes de conseils et aider à une meilleure mise en œuvre de ces mesures.

- **Mettre en œuvre des actions à court ou moyen terme, au niveau de la fabrication.**

Pour rappel, les mesures de maîtrise les plus efficaces identifiées pour limiter le développement des bactéries pathogènes lors de la fabrication sont l'acidification rapide du lait (pour *Salmonella* et STEC) et l'utilisation de souches de bactéries productrices de molécules inhibitrices (pour *L. monocytogenes*).

La collecte de données de terrain sur les cinétiques d'acidification selon les types de fromages permettrait d'affiner les pratiques utilisées et de nourrir le modèle actuel. L'impact de la mesure « acidification rapide », efficace sur la réduction du nombre de cas graves associés à *Salmonella* et STEC, pourra être évaluée avec une plus grande précision pour chaque type de fromage. Pour renforcer sa mise en œuvre, il sera nécessaire de sensibiliser les transformateurs, notamment fermiers, à l'importance du suivi et de la maîtrise de l'acidification, en s'appuyant sur les acteurs de terrain.

Concernant les souches de bactéries productrices de molécules inhibitrices, des travaux complémentaires sont à envisager pour sélectionner des couples ferment/technologie efficaces contre *L. monocytogenes*, sans altérer les qualités organoleptiques. L'effet inhibiteur devra être évalué en conditions réelles, notamment à l'aide de challenge-tests. Si les résultats sont concluants, ceci permettrait de confirmer l'effet de la mesure « molécule inhibitrice » sur la réduction de cas graves associés à *L. monocytogenes*.

Pour être pleinement considérées comme des mesures de maîtrise au sens des plans de maîtrise sanitaire des industriels, ces deux mesures (acidification et utilisation de souches inhibitrices) devraient faire l'objet d'une validation par les entreprises et/ou la filière.

Les résultats de ces actions visant à améliorer les mesures de maîtrise pourront être implémentés par le gestionnaire dans le module « fabrication » du modèle.

- **Concevoir et mettre en œuvre des actions à court ou moyen terme, avec l'aide des spécialistes en SHS, afin d'augmenter la sensibilisation du consommateur et de changer ses habitudes**

Pour rappel, au niveau du consommateur, les mesures de maîtrise les plus efficaces sont : (i) l'éviction de la consommation de certains fromages au lait cru pour les enfants de moins de 10 ans et les personnes âgées de plus de 65 ans, (ii) la non-consommation de la croûte, et (iii) la maîtrise de la température de réfrigération (avec deux options : <4 °C ou <8 °C).

Plusieurs leviers peuvent être activés pour soutenir ces mesures :

- informer le consommateur. Il y a en effet un manque de connaissance générale des consommateurs sur la nature des produits qu'ils consomment, les modes de production (fermier, artisanal, industriel) et les risques microbiologiques associés (notamment la distinction entre fromages au lait cru, pasteurisé ou thermisé). Plus largement, une campagne de sensibilisation à l'hygiène domestique auprès du grand public est nécessaire. Ces actions de sensibilisation devraient s'inscrire dans une stratégie de communication multicanal et multiplace, et viser à promouvoir durablement les mesures d'hygiène domestique essentielles et généralistes (ex. maîtrise de la température de réfrigération), tout en intégrant ces messages dans les campagnes nutritionnelles et éducatives existantes. (Anses, 2015) ;
- mobiliser les professionnels de santé, en mettant à jour leur niveau de connaissance et leur rôle dans le changement de comportement des publics à risque (jeunes enfants, personnes âgées...) ;
- renforcer l'adhésion à l'éviction de consommation de certains fromages au lait cru chez les enfants de moins de 10 ans, en proposant des supports de communication auprès

des parents, des professionnels de santé et des professionnels de la petite enfance. Le carnet de santé constitue un support privilégié pour communiquer auprès des parents en y diffusant des messages clairs et précis ;

- adapter les recommandations à la catégorie des personnes âgées de plus de 65 ans :
 - o pour les personnes en perte d'autonomie (celles vivant en institution ou celles bénéficiant d'une aide à domicile), communiquer auprès des professionnels de santé et des professionnels de l'aide à domicile pour faire respecter l'éviction de consommation de certains fromages au lait cru ;
 - o pour les personnes autonomes, s'appuyer sur les professionnels de santé et sur des campagnes de communication généraliste (associations, municipalités...) pour les sensibiliser ;
- promouvoir le contrôle ou la vérification des températures des réfrigérateurs à domicile, par l'usage de thermomètres de réfrigérateur ou d'équipements connectés ;
- identifier les freins au suivi de ces recommandations. En effet, certains consommateurs bien qu'avertis, ne suivent pas les recommandations ; des études socio-économiques seraient nécessaires pour analyser ces réticences, les conclusions des études viendraient appuyer les campagnes (sur le fond et la forme) auprès des consommateurs.

3.5.3. Quels travaux de recherche pour explorer et évaluer de nouvelles mesures de maîtrise ?

Ce troisième axe propose des pistes de recherche à plus long terme. Ces études pourraient permettre i) soit de mieux comprendre l'interaction entre les bactéries pathogènes et les différents microbiotes qu'ils rencontrent de la ferme au fromage, en vue de quantifier le comportement des agents pathogènes et d'identifier des mesures qui limiteraient leur développement, ii) soit d'améliorer les approches de prévision du comportement des microorganismes pathogènes et des autres espèces interagissant avec eux par le biais de développement de modèles.

- **Pathogènes et microbiotes**

Concernant l'étude des écosystèmes à la ferme, le GT propose de :

- mieux décrire la diversité (de composition, de structure-fonctions et des interactions) des microbiotes intestinaux des animaux d'élevage, leur évolution dans le temps de production de l'animal et selon les typologies d'élevages ;
- continuer à explorer comment des bactéries bénéfiques (dans l'environnement, la nourriture et le tractus intestinal des animaux) peuvent limiter la croissance et le portage animal des agents pathogènes (salmonelles, STEC de sérotype O26:H11,...) et au final la présence de ces agents dans le lait de tank ;
- conduire des travaux visant à développer des bactéries ou complexes bactériens utilisables comme probiotique pour les animaux ;
- évaluer l'impact de la qualité intrinsèque des aliments (nature et composition des rations consommées) ou d'un changement de l'alimentation sur le microbiote et l'excrétion des agents pathogènes mais aussi sur la santé et le bien-être des animaux, (notamment l'inflammation, même modérée, du tractus digestif dont on sait qu'elle peut influer sur la colonisation des *E. coli* et des salmonelles).

En lien avec ces études, le GT propose également de :

- renforcer les connaissances de l'impact :

- des différents types d'élevages (stabulation, transhumance, extensif/libre, élevage bio *versus* conventionnel, mesures de biosécurité en place),
- de la qualité de l'eau utilisée pour nettoyer les équipements ou abreuver les animaux,
- de l'hygiène des locaux et des conditions de traite (efficacité des protocoles de nettoyage des trayons et des équipements de traite vis-à-vis de la réduction de la contamination des surfaces par des agents pathogènes [biofilms]),
- sur la qualité sanitaire du lait cru et/ou sur la dissémination inter-élevages des agents pathogènes ;
- explorer les relations entre la santé et le bien-être des ruminants (notamment les mammites, mais aussi d'autres affections) et la contamination bactérienne du lait. Il serait intéressant d'identifier des marqueurs d'infection ou d'inflammation chez les animaux qui permettraient d'améliorer la détection des microorganismes d'intérêt, au-delà des indicateurs classiques comme les cellules somatiques dans le lait.

Concernant l'étude des écosystèmes en fabrication, le GT propose de continuer les efforts de recherche afin de :

- mieux comprendre les interactions entre le microbiote naturel des laits crus (bovin, ovin, caprin) et les agents pathogènes tout au long du processus d'élaboration des fromages au lait cru ;
- étudier la relation entre les fonctionnalités des micro-organismes d'affinage, les évolutions des caractéristiques physico-chimiques de la matrice fromage en surface et à cœur (pH, aw, composition particulière) et le comportement des agents pathogènes (croissance ou inactivation) ;
- comprendre les interactions physico-chimiques entre la matrice fromagère en formation et les agents pathogènes en prenant en compte leur diversité, pour prévoir leur niveau d'interaction avec le caillé.

- **Quantification - modélisation**

Concernant la modélisation, le GT propose de :

- connaître les mécanismes conduisant à la super-excrétion des STEC et des entérobactéries en général. En effet, la proportion d'animaux super-excréteurs de STEC dans les matières fécales est une donnée d'entrée du modèle qui intervient dans l'estimation des infections à STEC. Or la super excrétion n'est pas un phénomène continu et les données actuelles de la littérature ne permettent pas d'expliquer ni de prévoir la fréquence de ces phénomènes dont le déterminisme est vraisemblablement multifactoriel ;
- prendre en compte l'effet « saison » dans le modèle pour réduire les incertitudes tant au niveau de la production que de la consommation. Cet effet « saison » nécessiterait non seulement d'acquérir des données supplémentaires mais également de modifier le modèle pour inclure celui-ci⁴ ;
- questionner les modèles de microbiologie prévisionnelle utilisés dans cette expertise, qui bien que largement adoptés dans la littérature ne sont peut-être pas les plus adaptés au cas d'étude. En particulier i) approfondir l'effet « matrice » dans les modèles de croissance et de décroissance (par ex. effet sur la latence avant croissance ou inactivation), ii) considérer l'effet « flores annexes » dans les modèles de croissance et de décroissance, iii) remettre en question l'utilisation d'un modèle gamma sans

⁴ Cette recommandation est donc plus complexe à mettre en œuvre que celles listées en section 3.5.1, raison pour laquelle elle figure dans les pistes de recherche à plus long terme

interaction pour décrire le taux de croissance alors qu'un effet combiné des inhibiteurs (« *hurdle effect* ») résultant des températures réfrigérées peut être supposé, des pH, des acides organiques et de la matrice lait/fromage ; iv) développer des modèles prévisionnels qui intègrent davantage la dynamique de l'effet des procédés de transformation sur la croissance et l'inactivation des pathogènes ;

- explorer de nouvelles approches de modélisation s'appuyant sur le « *machine learning* » ou l'IA (exemple des approches de traitement des données massives issues des filières et des pratiques des consommateurs) et en faire une analyse critique ;
- identifier et acquérir les données nécessaires (et les formats utiles), pour des approches multicritères quantitatives de type bénéfice-risque pour la santé du consommateur ou même des évaluations coût-bénéfice de la filière (dimensions environnementale et économique comprises).

3.6. Conclusions du CES BIORISK

Le travail d'expertise du GT FALC2 a permis de bâtir un modèle d'appréciation quantitative du risque reliant plusieurs mesures de maîtrise et de surveillance au nombre de cas de toxic-infections alimentaires (TIA) chez l'Homme liées à la consommation de fromage au lait cru⁵ (cas totaux, cas graves, décès). Le CES endosse les travaux et les recommandations du GT FALC2. Les mesures de maîtrise ont été choisies sur la base des travaux du GT FALC1, complétés d'une analyse critique de la littérature récente.

Le modèle est construit en 3 modules : la ferme, la fabrication et la consommation de fromages. Cependant les acteurs associés à ces trois modules (respectivement les éleveurs, fabricants et consommateurs) n'ont pas le même rôle et surtout pas la même responsabilité au regard de la loi. Le [règlement \(CE\) n°178/2002](#) assigne la responsabilité de la sécurité des denrées aux professionnels qui les placent sur le marché⁶.

Le modèle développé cible les 11 combinaisons danger/fromage/espèce animale qui ont été jugées comme prioritaires par le GT FALC1, à savoir :

- *Escherichia coli* productrices de shigatoxine (STEC) dans les fromages à pâte molle et croûte fleurie au lait de vache et au lait de chèvre, ainsi que dans les fromages à pâte pressée non cuite et affinage court au lait de vache et de brebis ;
- *Salmonella* dans les fromages à pâte molle à croûte fleurie au lait de vache et au lait de chèvre, ainsi que dans les fromages à pâte pressée non cuite à affinage court au lait de vache ;
- *L. monocytogenes* dans les fromages à pâte molle et croûte fleurie au lait de vache et au lait de chèvre, ainsi que dans les fromages à pâte molle et croûte fleurie et dans les fromages à pâte pressée non cuite et affinage court au lait de vache.

Il est rappelé que les fromages à pâte cuite (par ex. emmenthal, gruyère, comté) ne sont pas des fromages à risque et ils ont été exclus des recommandations d'éviction de consommation pour les enfants de moins de cinq ans (Anses 2019a, 2019b), les femmes enceintes (Anses 2019d) et les personnes de plus de 65 ans (Anses 2019c). Ils ne sont donc pas concernés par cette étude. Le modèle a été développé à l'aide du logiciel R. Le code est disponible dans

⁵ Des éléments du modèle développé pour *L. monocytogenes* (modules fabrication et consommateur) pourraient être utiles à l'évaluation des risques de listériose en lien avec les fromages PMCF, PMCL et PPNCC au lait pasteurisé.

⁶ <https://agriculture.gouv.fr/la-reglementation-sur-l-hygiene-des-aliments>

l'entrepôt d'archives et de données Zenodo⁷, ainsi que les principales sorties du modèle⁸. Ce modèle prend en compte les mesures de maîtrise déjà en place (scénario de base) et mises en œuvre par la plupart des éleveurs, des transformateurs et des consommateurs (voir la section 3.2 de l'avis). Le modèle a permis de tester, via différents scénarios alternatifs, en production fermière et en production industrielle, des mesures de maîtrise ou de surveillance supplémentaires qui ne sont pas (ou seulement partiellement) appliquées à ce jour. Parmi celles-ci, les plus efficaces sont :

- pour réduire le nombre de cas graves dus aux STEC : l'introduction de nouveaux animaux provenant uniquement de troupeaux indemnes du sérotype O26:H11 (groupe I, *stx2a+* et/ou *stx2d+* ; Anses 2023), l'acidification maîtrisée et la plus rapide possible du lait dans la gamme permise par la technologie concernée, l'éviction de la consommation pour les enfants de moins de 10 ans, l'exclusion, pour la transformation, des laits de tank contenant plus de 10 unités formant colonies par millilitre pour le critère d'hygiène *E. coli*, et la recherche systématique des STEC dans les lots de fromage (n = 5) ;
- pour réduire le nombre de cas graves dus à *Salmonella* : l'introduction de nouveaux animaux indemnes de *Salmonella* Dublin (issus de troupeaux indemnes ou testés individuellement), l'acidification la plus rapide possible du lait dans la gamme permise par la technologie concernée, la recherche de *Salmonella* dans le lait avant transformation, et systématiquement dans les lots de fromage (n = 5) ;
- pour réduire le nombre de cas graves dus à *Listeria monocytogenes* : l'utilisation de souches productrices de molécules inhibitrices lors de la fabrication, la maîtrise de la température de réfrigération (moins de 4 °C ou moins de 8 °C) chez le consommateur, l'éviction de la consommation pour les personnes âgées de plus de 65 ans, et la non-consommation de la croûte. Il est important de rappeler que la température cible de réfrigération est généralement de 4 °C. La valeur de 8 °C n'est pas une température recommandée : elle a été utilisée dans le modèle pour représenter une situation de mésusage dans la plage des températures raisonnablement prévisibles. Par ailleurs, l'effet relativement similaire d'un maintien en dessous de 4°C ou de 8°C, constaté dans cette expertise sur les fromages au lait cru, ne peut pas être généralisé à d'autres denrées (par ex. viande et poisson) ou à d'autres dangers.

Deux mesures efficaces spécifiquement pour un danger n'ont pas été retenues en raison d'effets antagonistes avec les autres dangers. Ainsi, l'allongement de la durée d'affinage réduit le nombre de cas d'infection à STEC et *Salmonella* mais accroît le risque de listériose. De la même façon, la mesure consistant à ne pas avoir de consommation après 4 semaines de conservation est efficace contre la listériose mais accroît le risque d'infections à STEC et *Salmonella*.

Les mesures les plus efficaces ont été identifiées indépendamment de leur faisabilité opérationnelle, de leur coût et de leur acceptabilité par les différentes parties prenantes impliquées dans la production de lait, la transformation ou la consommation de fromage au lait cru en France. Toutefois, une série d'actions pour accompagner leur mise en œuvre et vérifier leur efficacité sur le terrain a été proposée (voir section 3.5.2 de l'avis). De plus, le GT a listé des pistes d'amélioration du modèle lui-même, à court terme, portant sur la précision des

⁷ 10.5281/zenodo.17647556

⁸ Annexe 6 du rapport

résultats (voir section 3.5.1 de l'avis), ainsi que des actions de recherche à plus long terme (section 3.5.3 de l'avis).

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) endosse les conclusions du CES BIORISK. Elle souligne la valeur ajoutée d'une modélisation rigoureuse reliant explicitement des pratiques concrètes pouvant être mises en œuvre dans la filière des fromages fabriqués à partir de lait cru (à la ferme, en fabrication et à la consommation) aux paramètres d'un modèle d'appréciation quantitative des risques (AQR), permettant ainsi d'estimer quantitativement l'impact de mesures de maîtrise et de surveillance. Ceci s'est accompagné d'un travail de priorisation des mesures de maîtrise qui appuie avec robustesse les recommandations opérationnelles discutées. Ces travaux sont particulièrement importants au regard des cas graves, parfois mortels de salmonellose, listériose ou syndromes hémolytiques et urémiques (SHU) dénombrés chaque année, auxquels la consommation de fromage au lait cru peut être associée.

L'Agence fait le constat que certaines mesures de maîtrise et de surveillance évaluées dans ces travaux permettent de réduire drastiquement l'incidence des cas graves, comme l'introduction dans les élevages de nouveaux animaux provenant uniquement de troupeaux indemnes du sérotype O26:H11 stx2a/stx2d ou de nouveaux animaux indemnes de *Salmonella* Dublin, pour limiter respectivement les cas graves de STEC et de salmonellose. Elles méritent de ce fait toute l'attention tant des filières que des autorités. La diffusion de ces mesures, encore peu pratiquées en France, peut de plus bénéficier de l'expérience de leur mise en œuvre dans d'autres pays.

Dans le dispositif réglementaire en vigueur (notamment le Paquet Hygiène avec les règlements (CE) n°178/2002, 852/2004 et 853/2004), la responsabilité des plans de maîtrise sanitaire incombe aux opérateurs en mettant en œuvre aux différentes étapes des démarches de type HACCP (d'analyse des dangers et des points critiques pour leur maîtrise). Les présents travaux constituent des apports majeurs venant compléter les mesures de maîtrise mises en œuvre à l'heure actuelle. Aussi, l'Anses recommande tout particulièrement de documenter et valider sur le terrain les mesures évaluées comme les plus efficaces (acidification rapide selon les technologies, emploi de ferment producteurs de molécules inhibitrices, stratégies d'échantillonnage, etc.).

Compte tenu de l'impact tant sanitaire que médiatique des cas graves associés à la consommation de fromages au lait cru, ces évènements ont des répercussions sur l'ensemble de la filière. Aussi, l'Agence identifie comme un enjeu de progrès collectif, les améliorations évoquées et leur diffusion. A ce titre, elle insiste : d'une part, sur le rôle qu'ont vocation à jouer les GBPH (Guides de bonne pratique d'hygiène) et, d'autre part, sur le besoin de soutien et d'accompagnement des opérateurs (formation, retours d'expérience, outils de pilotage) afin d'accroître l'effectivité des mesures qu'elles soient existantes ou nouvellement identifiées. S'agissant des GBPH, et moyennant une réflexion propre à la filière sur le périmètre pertinent, l'Anses considère que les meilleures pratiques devraient être intégrées dans des guides à compléter ou à élaborer puis valider.

L'Agence souligne également l'importance de prendre compte des réalités sociales permettant d'inscrire ces mesures dans le contexte réel d'application, par exemple en évaluant leur faisabilité, leur coût et leur acceptabilité.

Au-delà des trois pathogènes détaillés dans cet avis, l'Anses souligne l'importance de mieux caractériser les souches pathogènes circulant dans la filière et de rester attentif à l'émergence possible de nouveaux agents. La mobilisation du séquençage génomique et des métadonnées harmonisées permet d'améliorer les investigations épidémiologiques et également d'identifier les souches les plus virulentes. Pour ces dernières, les mesures de maîtrise doivent être appliquées sans faille. Cette approche nécessite une gouvernance des données garantissant leur qualité, leur partage et leur exploitation rapide pour la gestion du risque, aussi bien au service de la détection d'émergences que de la gestion de situations d'urgence.

L'Agence souligne que le fait qu'une mesure puisse montrer un rendement chiffré limité dans les résultats du modèle ne signifie pas qu'elle n'est pas essentielle à la maîtrise du risque. En effet, certaines pratiques, déjà bien appliquées par de nombreux opérateurs, expliquent que le gain associé à leur renforcement est marginal par comparaison à d'autres dans les simulations. Elles demeurent toutefois un maillon indispensable dans une chaîne d'actions concourant au maintien d'un haut niveau de sécurité sanitaire tout au long de la filière.

S'agissant du volet relatif à la dernière étape depuis « la ferme jusqu'à la fourchette », l'Agence recommande de renforcer la communication de santé publique, en cohérence avec le plan national nutrition santé (PNNS), à destination des populations sensibles et des professionnels de santé, tout en promouvant des gestes d'hygiène domestique simples, tels que le contrôle effectif des températures de réfrigération ou les choix d'évitement⁹. Cette communication ne doit cependant pas conduire à déplacer en totalité la charge de la maîtrise du risque vers le consommateur, mais bien venir souligner la complémentarité de ces actions avec l'ensemble des actions menées par les professionnels en amont.

Par ailleurs, au regard des recommandations de recherche visant à affiner les scénarios et à réduire les incertitudes, l'Agence soutient la nécessité d'actualiser le modèle et appuie le besoin de renforcer l'acquisition de données ciblées pour réduire les incertitudes majeures décrites dans cet avis.

Enfin, dans la continuité des séries d'actions de l'Anses en faveur de la science ouverte, elle va mettre à disposition de la communauté le modèle développé dans le cadre de ces travaux afin d'en faire un outil disponible pour l'évaluation *ex ante* des mesures, tout en permettant d'enrichir les modèles déjà développés dans les filières.

Gilles Salvat

⁹ La température de conservation au réfrigérateur recommandée est de 4°C

MOTS-CLÉS

fromages au lait cru ; appréciation quantitative du risque microbiologique ; mesures de maîtrise ; surveillance ; populations sensibles

CITATION SUGGÉRÉE

Anses. (2025). Avis relatif aux modalités de maîtrise du risque lié à la présence de dangers microbiologiques dans les fromages et autres produits laitiers fabriqués à partir de lait cru. Saisine 2019-SA-0033. Maisons-Alfort : Anses, 27 p.

Modalités de maîtrise du risque lié à la présence de dangers bactériologiques dans les fromages et produits laitiers fabriqués à partir de lait cru

Deuxième partie

Saisine 2019-SA-0033 Fromages au lait cru

RAPPORT d'expertise collective

**CES d'évaluation des risques biologiques dans les aliments
(CES BIORISK)**

**Groupe de travail Fromages et produits laitiers au lait cru
(GT FALC)**

Septembre 2025

Citation suggérée

Anses. (2025). Rapport sur les modalités de maîtrise du risque lié à la présence de dangers bactériologiques dans les fromages et produits laitiers fabriqués à partir de lait cru. Deuxième partie. (saisine 2019-SA-0033). Maisons-Alfort : Anses, 146 p.

Mots clés

Fromages au lait cru, *Salmonella*, STEC, *Listeria monocytogenes*, mesures de maîtrise, consommateurs, surveillance.

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GROUPE DE TRAVAIL

Présidente

Mme Jeanne-Marie MEMBRÉ – INRAE – Ingénierie de recherche. Appréciation quantitative du risque microbiologique, modélisation, microbiologie prévisionnelle, évaluation risque-bénéfices et multicritères, statistiques appliquées.

Membres

M. Frédéric AUVRAY – École nationale vétérinaire de Toulouse – Ingénieur de recherche. Microbiologie des aliments et écologie microbienne, *Escherichia coli*, diagnostic microbiologique et séquençage de génomes.

Mme Lucie COLLINEAU – Chargée de recherche, Anses Lyon – Épidémiologie, appréciation des risques, maladies infectieuses animales et zoonotiques, *Salmonella*.

Mme Noémie DESRIAC – Université Bretagne occidentale – Maître de conférences. Microbiologie des aliments, bactéries sporulées, mécanismes d'adaptation des microorganismes au stress, microbiologie prévisionnelle.

Mme Florence DUBOIS-BRISSEONNET – AgroParisTech – Professeur. Microbiologie des aliments, biofilms, mécanismes d'adaptation bactérienne au stress, *Listeria monocytogenes*.

Mme Narjes MTIMET – École Nationale Vétérinaire d'Alfort. Maître de conférences. Microbiologie des aliments, microbiologie prévisionnelle, qualité et sécurité des aliments d'origine animale.

M. Eric OSWALD – CHU Toulouse - Université de Toulouse – Professeur des universités-Praticien hospitalier. Pathogénicité bactérienne, Toxines, *Escherichia coli*, antibiorésistance, génomique microbienne, microbiote, One health, infectiologie.

RAPPORTEURS

M. Mickaël BONI – Institut de recherche biomédicale des armées – Vétérinaire en chef, chef d'unité. Microbiologie, hygiène, salubrité et qualité des aliments, sûreté sanitaire des aliments et de l'eau, inspection en sécurité sanitaire des aliments, traitement et contrôle sanitaire des EDCH, épidémiologie des eaux usées.

Mme Catherine CHUBILLEAU – Centre hospitalier de Niort – Chef de service. Hygiène des aliments, épidémiologie, microbiologie des aliments, plan de maîtrise sanitaire, EDCH.

M. Michel FEDERIGHI – École Nationale Vétérinaire d'Alfort – Professeur. Microbiologie des aliments, hygiène et qualité des aliments, analyse des dangers, HACCP, filières et technologies alimentaires des viandes et des produits transformés.

M. Michel GAUTIER – Institut Agro Rennes-Angers – Professeur. Microbiologie alimentaire, biologie moléculaire, OGM microbiens, bactériophages, aliments fermentés, bactéries pathogènes.

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

- CES « Évaluation des risques biologiques liés aux aliments (BIORISK) - 2022-2026

Président

M. Philippe FRAVALO – Conservatoire National des Arts et Métiers, Professeur. Microbiologie des aliments, filières viandes, dangers bactériens, *Salmonella*, *Campylobacter*, *Listeria monocytogenes*, méthodes (dont métagenomique 16S des contenus digestifs et des surfaces, caractérisation moléculaire des dangers), élevage /abattage.

Membres

M. Frédéric AUVRAY – École nationale vétérinaire de Toulouse – Ingénieur de recherche. Microbiologie des aliments et écologie microbienne, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, bactéries pathogènes zoonotiques, microbiote, bactériophages, diagnostic microbiologique et séquençage de génomes.

M. Mickaël BONI – Institut de recherche biomédicale des armées – Vétérinaire en chef, chef d'unité. Microbiologie, hygiène, salubrité et qualité des aliments, sûreté sanitaire des aliments et de l'eau, inspection en sécurité sanitaire des aliments, traitement et contrôle sanitaire des EDCH, épidémiologie des eaux usées.

M. Frédéric BORGES – Université de Lorraine – Maître de conférences. *Listeria*, génie génétique, biopréservation, écosystèmes alimentaires fermentées, génotypage, phénotypage, HACCP.

M. Gilles BORNERT – Service de santé des armées de Rennes – Vétérinaire en chef. Microbiologie des aliments et des eaux, écologie microbienne, réglementation, sécurité sanitaire des aliments, HACCP, filière eau et restauration collective.

M. Frédéric CARLIN – INRAE (jusqu'en mars 2023) – Directeur de recherche. Bactéries sporulées, *Bacillus*, *Clostridium*, effets des procédés, microbiologie prévisionnelle, produits végétaux.

Mme Catherine CHUBILLEAU – Centre hospitalier de Niort – Chef de service. Hygiène des aliments, épidémiologie, microbiologie des aliments, plan de maîtrise sanitaire, EDCH.

Mme Monika COTON – Université de Brest – Professeure. Microbiologie des aliments, produits fermentés, mycologie, Écologie microbienne, métabolites secondaires (dont mycotoxines, amines biogènes, composés volatils), méthodes analytiques, biologie moléculaire.

M. Georges DAUBE – Université de Liège – Professeur des universités. Microbiologie des aliments, évaluation quantitative de risques microbiologiques, HACCP, Bonnes Pratiques d'Hygiène, filière viande et lait.

Mme Noémie DESRIAC – Université Bretagne occidentale – Maître de conférences. Microbiologie des aliments, bactéries sporulées, mécanismes d'adaptation des microorganismes au stress, microbiologie prévisionnelle.

Mme Florence DUBOIS-BRISONNET – AgroParisTech – Professeur. Microbiologie des aliments, biofilms, mécanismes d'adaptation bactérienne au stress (dont conservateurs, désinfectants, réfrigération), biochimie membranaire, *Listeria monocytogenes*.

M. Michel FEDERIGHI – École Nationale Vétérinaire d'Alfort – Professeur. Microbiologie des aliments, hygiène et qualité des aliments, analyse des dangers, HACCP, filières et technologies alimentaires des viandes et des produits transformés.

M. Michel GAUTIER – Institut Agro Rennes-Angers – Professeur. Microbiologie alimentaire, biologie moléculaire, OGM microbiens, bactériophages, aliments fermentés, bactéries pathogènes.

Mme Michèle GOURMELON – IFREMER – Chargée de recherche. Bactériologie et biologie moléculaire, écologie microbienne des milieux marins côtiers dont coquillages et zones conchyliques et du continuum terre-mer, bactéries environnementales et d'intérêt sanitaire, *Campylobacter*.

Mme Sandrine GUILLOU – ONIRIS – Ingénieur de recherche. Évaluation des risques sanitaires, microbiologie et écologie microbienne des aliments, modélisation, *Campylobacter*, procédés de décontamination, méthode de détection, mécanismes d'adaptation aux stress environnementaux, filière volaille.

M. Stéphane GUYOT – Institut Agro Dijon – Maître de conférences. Microbiologie des aliments, poudres alimentaires, pathogènes, bactéries, virus, procédés de décontamination, mécanismes d'adaptation aux stress environnementaux.

M. Didier HILAIRE – Direction générale pour l'armement – Ingénieur, adjoint innovation ouverte ; architecte décontamination et contre-mesures médicales NRBC. Toxines bactériennes et végétales, toxines botuliques, risques biologiques, décontamination et identification des agents biologiques.

Mme Nathalie JOURDAN-DA SILVA – Santé publique France – Médecin épidémiologiste, chargée de projet scientifique. Épidémiologie des maladies entériques et zoonoses, investigations.

Mme Claire LE HENAFF-LE MARREC – Bordeaux INP, INRAE – Professeur des universités. Microbiologie des aliments, écologie microbienne, bactéries lactiques, bactériophages, fermentation malo-lactique.

Mme Sandra MARTIN-LATIL – Anses, Laboratoire de sécurité des aliments – Directrice de recherche. Virologie alimentaire, méthodes de détection, procédés de décontamination.

Mme Jeanne-Marie MEMBRÉ – INRAE – Ingénierie de recherche. Appréciation quantitative du risque microbiologique, modélisation, microbiologie prévisionnelle, évaluation risque-bénéfices et multicritères, statistiques appliquées.

M. Eric OSWALD – CHU Toulouse - Université de Toulouse – Professeur des universités-Praticien hospitalier. Pathogénicité bactérienne, Toxines, *Escherichia coli*, antibiorésistance, génomique microbienne, microbiote, One health, infectiologie.

Mme Nadia OULAHAL – Université Claude-Bernard Lyon 1 – Professeure. Microbiologie des aliments, hygiène des aliments, interactions biomolécules antimicrobiennes - aliments, écosystème microbien alimentaire, biofilms, Biopréservation.

M. Pascal PIVETEAU – INRAE – Directeur de recherche. *Listeria monocytogenes* ; écologie microbienne, écologie des bactéries pathogènes dans les agroenvironnements, systèmes alimentaires, filière végétaux.

Mme Sabine SCHORR-GALINDO – Université Montpellier – Professeur des universités. Sécurité sanitaire des aliments, microbiologie alimentaire et industrielle, mycologie, mycotoxines, écologie microbienne, technologie alimentaire, HACCP, biotechnologie, filières fruits, café et cacao.

Mme Régine TALON – INRAE – Directrice de recherche, chargée de mission. Sciences des aliments, écologie microbienne, produits fermentés, ferment, bactéries pathogènes, filières viande et lait.

Membre du CES en potentiel conflit d'intérêt n'ayant pas participé à l'expertise

Mme Isabelle VILLENA – CHU Reims, Université Reims Champagne-Ardenne – Professeur des universités-Praticien Hospitalier, Chef de service Hôpital Reims, Directeur du CNR de la Toxoplasmose. Évaluation des risques sanitaires, parasitologie, mycologie médicale, infectiologie clinique, épidémiologie, biologie moléculaire.

PARTICIPATION ANSES**Coordination et contribution scientifique**

M. Laurent GUILLIER, Chef de projets scientifiques, UERALIM, Direction de l'Évaluation des Risques

Mme Estelle CHAIX, Coordinatrice d'expertise scientifique, UERALIM, Direction de l'Évaluation des Risques

Demande d'appui scientifique et technique interne à l'Anses par le réseau *Salmonella*

Mme Nibangue LARE, Chargée de projet en surveillance épidémiologique, Laboratoire de sécurité des aliments, Unité *Salmonella et Listeria*

M. Vincent LECLERC, Responsable de l'équipe Surveillance, Laboratoire de sécurité des aliments, Unité *Salmonella et Listeria*

Secrétariat administratif

Mme Angélique LAURENT – Direction de l'Évaluation des Risques

Mme Armelle VIGNERON – Direction de l'Évaluation des Risques

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

M. Frédéric BERTASSI - DRAAF-NOUVELLE-AQUITAINE/SRAL. Référent National Produits Laitiers

M. Frank LOUVET - DGAL/SAS/SDSSA/BETD

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Sigles et abréviations.....	10
Liste des tableaux	11
Liste des figures.....	12
1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise.....	15
1.1 Contexte	15
1.2 Objet de la saisine	15
1.2.1 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation.....	15
1.3 Prévention des risques de conflits d'intérêts	16
2 Introduction.....	17
2.1 Rappels des conclusions du premier groupe de travail et liste des couples retenus pour l'appréciation quantitative des risques	17
2.2 Approche retenue pour répondre aux actions A3 et A5.....	18
3 Mesures de maîtrise considérées dans le modèle	20
3.1 Mesures de maîtrise dans les élevages, de l'animal au lait de tank	21
3.1.1 STEC.....	21
3.1.2 <i>Salmonella</i>	23
3.1.3 <i>L. monocytogenes</i>	26
3.1.4 Suivi des indicateurs microbiologiques	28
3.2 Mesures de maîtrise et de surveillance pendant la transformation fromagère.....	28
3.2.1 Mesures de maîtrise pendant la transformation	28
3.2.2 Surveillance microbiologique en cours de fabrication ou sur les produits finis.....	30
3.3 Mesures de maîtrise en lien avec les consommateurs	34
4 Modèles d'appréciation des risques	36
4.1 Identification et caractérisation des dangers	36
4.1.1 STEC.....	36
4.1.2 <i>Salmonella</i>	38
4.1.3 <i>L. monocytogenes</i>	39
4.2 Construction du modèle pour l'intégration des mesures de maîtrise et de surveillance	40
4.2.1 Cas de la transformation par les entreprises.....	41
4.2.2 Cas de la production fermière	53
4.2.3 Spécificités liées aux caprins et ovins	54
4.3 Vérification des modules et des modèles d'appréciation des risques	54
5 Sorties du modèle du scénario de base.....	55

5.1	Illustrations des résultats pour les fromages à pâte molle et croûte fleurie au lait de vache et pour le scénario de base	55
5.1.1	Module « ferme »	55
5.1.2	Module « fabrication »	63
5.1.3	Module « consommateurs »	66
5.1.4	Illustration des sorties du modèle relatives au risque	70
5.2	Sorties du modèle en prenant en compte la variabilité et l'incertitude pour le scénario de base des 11 combinaisons danger/fromage/espèce animale	72
5.2.1	STEC	73
5.2.2	<i>Salmonella</i>	74
5.2.3	<i>L. monocytogenes</i>	74
5.2.4	Conclusion sur les résultats de la modélisation du risque pour le scénario de base	75
5.3	Analyse d'incertitude pour le scenario de base	76
5.3.1	Analyse quantitative des incertitudes	76
5.3.2	Analyse qualitative des incertitudes (ACCMER)	80
6	Efficacité des mesures de maîtrise et de surveillance	82
6.1	Illustration de l'effet des mesures de maîtrise pour les PMCFb	82
6.1.1	Mesures de maîtrise au niveau de la ferme	83
6.1.2	Mesures de maîtrise et de surveillance au stade de la fabrication	84
6.1.3	Mesures de maîtrise au niveau du consommateur	85
6.2	Effet des mesures les plus efficaces sur le risque	87
6.2.1	Impact global des mesures par module (tous les agents pathogènes et tous les fromages)	87
6.2.2	Effet, par microorganisme pathogène et par type de fromage, des mesures individuelles les plus efficaces	89
6.2.3	Effet de la combinaison de mesures (illustré à partir des mesures efficaces sur les STEC dans le cas des PMCF au lait cru de bovins)	92
6.2.4	Efficacités des mesures applicables spécifiquement aux conditions fermières	94
7	Recommandations de recherche	95
7.1	Quelles données pour améliorer la précision des résultats du modèle ?	95
7.2	Recommandations à court et moyen termes liées aux mesures de maîtrise les plus efficaces	97
7.2.1	Concevoir des actions à court et moyen terme, au niveau de la ferme	97
7.2.2	Concevoir des actions à court et moyen terme, au niveau de la fabrication	98
7.2.3	Concevoir des actions à court et moyen terme, avec l'aide des spécialistes en SHS, afin d'augmenter la sensibilisation du consommateur et d'orienter ses habitudes	98
7.3	Quels travaux de recherche pour explorer et évaluer de nouvelles mesures de maîtrise ?	100

7.3.1	Pathogènes et microbiotes	100
7.3.2	Quantification - modélisation.....	101
8	Conclusions du groupe de travail FALC2 et du CES BIORISK.....	102
9	Bibliographie.....	104
9.1	Publications	104
Annexe 1 : Lettre de saisine		114
Annexe 2 : Sélection des articles.....		117
Annexe 3 : Synthèse des mesures de maîtrise identifiées pour la production et la fabrication des fromages au lait cru		120
Annexe 4 : Description détaillée des modèles d'appréciation des risques		127
Annexe 5 : Tableau des incertitudes selon la méthode du GT ACCMER		135
Annexe 6 : Résultats détaillés de l'efficacité des mesures de maîtrise et de surveillance		146

Sigles et abréviations

CES	: Comité d'experts spécialisé
DDM	: Date de Durabilité Minimale
DLC	: Date Limite de Consommation
Efsa	: European food safety authority
FSIS	: Food Safety and Inspection Service
PMCF	: Pâte molle à croûte fleurie
PMCL	: Pâte molle à croûte lavée
PMS	: Plan de maîtrise sanitaire
PPNCC	: Pâte pressée non cuite à affinage court
STEC	: <i>Escherichia coli</i> productrice de Shiga-toxines
SHS	: Sciences Humaines et Sociales
TBEV	: Virus de l'encéphalite à tique (« <i>tick-borne encephalitis virus</i> »)

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des onze situations prises en considération dans le développement du modèle AQR.....	17
Tableau 2 : Surveillance des STEC dans les élevages : synthèse des pratiques actuelles et des scénarios à tester	23
Tableau 3. : Surveillance de <i>Salmonella</i> dans les élevages : synthèse des pratiques actuelles et des scénarios à tester	25
Tableau 4 : Surveillance de <i>L. monocytogenes</i> dans les élevages : synthèse des pratiques actuelles et des scénarios à tester	27
Tableau 5 : Scénarios de surveillance microbiologique dans le cadre de la transformation fermière ou industrielle	33
Tableau 6 : Illustration des résultats obtenus par simulation d'une journée parmi les 300 jours. Ce résultat est tiré d'une seule itération parmi les 250 réalisées. Cas pour les bovins dans le scénario de base.	57
Tableau 7 : Illustration des résultats obtenus par simulation d'une journée parmi les 300 jours de consommation. Ce résultat est tiré d'une seule itération parmi celles réalisées dans la dimension de variabilité et d'incertitude. Cas pour les fromages de type pâte molle à croûte fleurie contaminés par STEC O26:H11 et <i>Listeria monocytogenes</i> dans le scénario de base	69
Tableau 8 : Illustration de la sortie du modèle en termes de calcul de risque par lot puis de risque global annuel	71
Tableau 9 : Médiane et intervalle d'incertitude à 95% du risque moyen pour le scénario de base pour les productions fermières (F) et industrielles (I) (toutes classes d'âge confondues)	72
Tableau 10 : Effet des différentes mesures de maîtrise et de surveillance au stade de la ferme sur la variation du nombre de cas graves associés à la consommation de fromages PMCF au lait cru de bovin	83
Tableau 11 : Effet des différentes mesures de maîtrise et de surveillance au stade de la fabrication sur la modification du nombre de cas graves associés à la consommation de fromages à PMCF au lait cru de bovin.....	84
Tableau 12 : Effet des différentes mesures de maîtrise au stade de la consommation sur la modification du nombre de cas graves associés à la consommation de fromages à PMCF au lait cru de bovin	86

Liste des figures

Figure 1 : Synthèse des facteurs de risque pour les STEC au stade de la ferme et mesures de maîtrise correspondantes	22
Figure 2 : Synthèse des facteurs de risques pour <i>Salmonella</i> spp. (A) et <i>Salmonella</i> Dublin (B) au stade de la ferme et mesures de maîtrise correspondantes.....	25
Figure 3 : Synthèse des facteurs de risque pour <i>L. monocytogenes</i> au stade de la ferme et mesures de maîtrise correspondantes.....	27
Figure 4 : Synthèse des facteurs de risques et des mesures de maîtrise correspondantes pour la fabrication des fromages à pâte molle et à pâte pressée non cuite à affinage court	30
Figure 5 : Synthèse des facteurs de risque et des mesures de maîtrise au stade de la consommation. Les carrés spécifient les dangers visés par les mesures de maîtrise	35
Figure 6 Schéma d'ensemble du modèle développé pour les fromages de lait de vache. Les mesures de maîtrise peuvent conduire à éliminer une ferme, une vache, le lait issu d'une ferme, un lot issu d'un atelier, un type de consommateurs.	41
Figure 7 Répartition des niveaux de STEC dans les matières fécales. Les données en rouge sont issues de Stephens et al. (2009). Les données en bleu correspondent à la fraction indéetectable. Les courbes représentent l'ajustement de la loi bi-normale et représentent la loi de distribution utilisée pour le modèle STEC et STEC O26 :H11 <i>stx2a+</i> et/ou <i>stx2d+</i>	45
Figure 8 Répartition de <i>Salmonella</i> dans les matières fécales des bovins. Les courbes représentent la variabilité et l'incertitude de loi normale ajustées sur le \log_{10} des concentrations observées en ufc/g (données issues de (Bonifait et al. 2021)).....	48
Figure 9 Profils possibles d'acidification pour les fromages à pâte molle (A) (d'après Perrin et al. 2015) et à pâte pressée non cuite (B) (d'après Anses, 2018).	50
Figure 10 : Schéma pour les fromages au lait de vache dans le cas de la transformation fermière. Les mesures de maîtrise peuvent conduire à éliminer une ferme, une vache, le lait issu d'une ferme, un lot issu d'un atelier fermier, un type de consommateurs	53
Figure 11 Distribution du nombre moyen d'animaux porteurs de STEC par ferme en fonction du niveau de maîtrise de l'hygiène et de l'alimentation dans les fermes (résultats pour 250 itérations, 66 animaux par ferme au maximum). Les points indiquent la médiane de la distribution, les barres représentent l'intervalle de crédibilité, et la zone de densité illustre la distribution complète des valeurs.	59
Figure 12 Distribution de la médiane du nombre d'ufc en STEC par ferme en fonction du niveau de maîtrise de l'hygiène et de l'alimentation dans les fermes (résultats pour 250 itérations, dans un volume maximum de 25 L x 66 animaux par ferme). Les points indiquent la médiane de la distribution, les barres représentent l'intervalle de crédibilité, et la zone de densité illustre la distribution complète des valeurs.....	60
Figure 13 Distribution du nombre moyen d'animaux porteurs de <i>Salmonella</i> par ferme en fonction du niveau de maîtrise de l'hygiène (résultats pour 250 itérations, 66 animaux producteurs par ferme au maximum). Les points indiquent la médiane de la distribution, les barres représentent l'intervalle de crédibilité, et la zone de densité illustre la distribution complète des valeurs.	60
Figure 14 Distribution de la médiane du nombre d'ufc en <i>Salmonella</i> par ferme en fonction du niveau de maîtrise de l'hygiène (résultats pour 250 itérations, volume maximum de 25 L x 66	

animaux par ferme). Les points indiquent la médiane de la distribution, les barres représentent l'intervalle de crédibilité, et la zone de densité illustre la distribution complète des valeurs...61	
Figure 15 Distribution de la médiane d'ufc de <i>L. monocytogenes</i> par tank en fonction du niveau de maîtrise de l'hygiène et des équipements de traite (résultats pour 250 itérations, volume maximum de 25 L x 66 par ferme). Les points indiquent la médiane de la distribution, les barres représentent l'intervalle de crédibilité, et la zone de densité illustre la distribution complète des valeurs.62	
Figure 16 Distribution du nombre médian annuel de dépassements par ferme du critère <i>E. coli</i> lors de la surveillance des laits de tank (limite de 50 ufc/mL, pour 30 contrôles annuels et donc pour un maximum de 30 dépassements possibles)62	
Figure 17 : Distributions des concentrations en STEC dans le lait de tank des entreprises pour une itération du modèle (31 fermes collectées). LOD : Limite de détection fixée à 0,2 ufc/mL.63	
Figure 18 Distribution du nombre de lots positifs à STEC, STEC groupe I ou <i>E. coli</i> (selon le plan d'échantillonnage retenu dans le scénario de base) pour une année de production de 300 lots (résultats pour 250 itérations).64	
Figure 19 Évolution du pH et de la température, durant les étapes de stockage du lait, de caillage, d'égouttage et de salage des PMCF (scénario de base)64	
Figure 20 Taux de croissance maximum des trois pathogènes STEC, <i>Salmonella</i> et <i>L. monocytogenes</i> (respectivement par des lignes rouge, bleue et noire) au cours des quatre premières étapes du procédé de fabrication des PMCF. Elles dépendent des caractéristiques des micro-organismes, de l' a_w , et des conditions de pH et de température présentées dans la figure 19.65	
Figure 21 Évolution de la concentration (A) des STEC O26 (trait rouge) et non O26 (trait jaune) dans les fromages (cœur et croûte confondus) et (B) de <i>Salmonella</i> dans le cœur et la croûte durant les étapes d'égouttage, de salage et d'affinage pour une contamination de 1 ufc/fromage.66	
Figure 22 Évolution de la concentration de <i>L. monocytogenes</i> pendant l'affinage et le stockage avant remise aux consommateurs de fromages à pâte molle à croûte fleurie pour une contamination initiale de 1 ufc/fromage66	
Figure 23 Répartition des consommations des fromages à pâte molle et croûte fleurie (d'après les données de l'enquête INCA3 pour les fromages au lait cru de cette catégorie).....67	
Figure 24 Distribution des durées de conservation chez les consommateurs des PMCF et illustration de l'impact des températures de conservation au réfrigérateur et d'une remise à température à 20°C des fromages pendant 2h sur la croissance (\log_{10} ufc/g) de <i>L. monocytogenes</i> avec une contamination initiale de 1 ufc/g).....68	
Figure 25 Répartition des quantités de <i>L. monocytogenes</i> ingérées dans les portions contaminées du lot #1 de fromages à PMCF.....70	
Figure 26 Influence de l'incertitude des paramètres d'entrée sur l'estimation des infections à STEC (résultats pour 100 itérations).77	
Figure 27 Influence de l'incertitude des paramètres d'entrée sur l'estimation du risque de salmonellose (résultats pour 100 itérations).78	
Figure 28 Influence de l'incertitude des paramètres d'entrée sur l'estimation du risque de listériose (résultats pour 100 itérations).79	

Figure 29. Nombres de cas graves d'infection à STEC prédicts par les modèles d'AQR, pour la situation actuelle et pour la situation où l'ensemble des mesures de maîtrise et de surveillance seraient appliquées à chacun des trois stades (à la ferme, à la fabrication, chez le consommateur)	88
Figure 30. Nombres de cas graves de salmonellose prédicts par les modèles d'AQR, pour la situation actuelle et pour la situation où l'ensemble des mesures de maîtrise et de surveillance seraient appliquées à chacun des trois stades.	88
Figure 31. Nombres de cas graves de listériose prédicts par les modèles AQR, pour la situation actuelle et pour la situation où l'ensemble des mesures de maîtrise et de surveillance seraient appliquées à chacun des trois stades.....	89
Figure 32. Nombres de cas graves liés aux STEC estimés selon différents scénarios d'intervention, pour quatre types de fromage. Les points reliés correspondent aux mesures qui s'appliquent à l'ensemble des fromages et les points non reliés à celles appliquées à seulement certains d'entre eux.....	90
Figure 33. Nombres de cas graves de salmonellose estimés selon différents scénarios d'intervention, pour trois types de fromage. Échelle logarithmique. Les points reliés correspondent aux mesures qui s'appliquent à l'ensemble des fromages et les points non reliés à celles appliquées à seulement certains d'entre eux.....	91
Figure 34. Nombres de cas graves de listérioses estimés selon différents scénarios d'intervention, pour quatre types de fromage (les résultats des mesures « maintien des températures des réfrigérateurs inférieures à 4 °C, à 8 °C et souche productrice de molécules inhibitrices sont confondus sur le graphique, elles sont au niveau du zéro).....	92
Figure 35 Comparaison des effets individuels et combinés des mesures efficaces pour les STEC sur le nombre de cas graves liés aux STEC.....	93

1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

1.1 Contexte

Les produits laitiers au lait cru et les fromages fabriqués à partir de lait cru font régulièrement l'objet de procédures de retrait-rappel et peuvent être notamment impliqués dans l'apparition de cas groupés de salmonelloses et de syndromes hémolytiques et urémiques (SHU). Les dernières alertes épidémiologiques interrogent sur l'efficacité des mesures de maîtrise pouvant être mises en œuvre dans la filière de production des fromages et autres produits laitiers fabriqués à partir de lait cru ainsi que sur l'évaluation de leur impact sur la réduction du risque pour le consommateur.

1.2 Objet de la saisine

La DGAI a saisi l'Anses pour réaliser six actions :

A1 – Établir quels sont les principaux dangers bactériens en lien avec les différents fromages et produits laitiers fabriqués à partir de lait cru en France.

A2 – Réaliser un bilan des connaissances relatives aux sources de contamination, aux mesures de maîtrise et à leur efficacité dans trois principales filières laitières (bovins, ovins, caprins), depuis le stade de l'élevage jusqu'au stade de distribution et de consommation, en passant par le stade de transformation des fromages et des produits laitiers fabriqués à partir de lait cru.

A3 – Évaluer l'impact des mesures de maîtrise sur la réduction du risque pour le consommateur.

A4 – Faire le point sur les méthodes analytiques (liste, performance, ...) disponibles pour la recherche des pathogènes dans les matrices.

A5 – Quantifier la performance de l'échantillonnage pour la maîtrise des risques.

A6 – Proposer des pistes de recherche pour améliorer la maîtrise des risques dans les fromages et produits laitiers fabriqués à partir de lait cru.

Un premier avis relatif aux deux premières actions a été publié en 2022 (Anses 2022). À la suite d'un échange avec la DGAI, il a été acté que l'action A4 n'était plus d'actualité. Ce deuxième avis porte donc sur les actions A3, A5 et A6.

1.2.1 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

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 (Janvier 2024) ».

L'expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques biologiques dans les aliments » (BIORISK) ». L'Anses a confié l'expertise au groupe de travail « GT FALC2 ». Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif

d'experts aux compétences complémentaires. Les travaux ont été présentés au CES BIORISK tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques entre le 06/04/2022 et le 17/09/2025. Ils ont été adoptés par le CES BIORISK réuni le 17/09/2025.

1.3 Prévention des risques de conflits d'intérêts

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. Dans ce contexte, une experte du CES BIORISK n'a pas pris part aux travaux et délibérations sur cette saisine

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

2 Introduction

2.1 Rappels des conclusions du premier groupe de travail et liste des couples retenus pour l'appréciation quantitative des risques

L'Anses a publié en 2022 la première partie de son expertise. La conclusion principale de la première question, concernant les priorités en termes de santé publique des différents dangers microbiologiques et catégories de fromages, était que les fromages à pâte molle (à croûte fleurie [PMCF] et lavée [PMCL]) et à pâte pressée non cuite à affinage court (PPNCC), associés à *Salmonella*, STEC et/ou *L. monocytogenes*, étaient prioritaires. Cette priorisation s'est appuyée sur un travail de hiérarchisation des risques, l'attribution des sources (données des épidémies) et l'analyse des données historiques de retrait et de rappel des produits concernés. Les données épidémiologiques récentes (Gonzalez et al. 2022) ainsi que les dernières expertises de l'Anses sur des fromages au lait cru (Anses 2024, 2025) ne remettent pas en cause la hiérarchisation réalisée dans le rapport du GT FALC1. Les experts du GT confirment que les conclusions restent pleinement valides et que la liste des agents pathogènes à considérer n'a pas évolué entre la première partie de l'expertise et cette seconde partie. Compte tenu de ces conclusions, le présent groupe de travail (GT FALC2) a concentré son attention sur onze combinaisons danger/fromage/espèce animale, comme présenté dans le tableau 1.

Tableau 1 : Liste des onze situations prises en considération dans le développement du modèle AQR

Dangers	Catégories de fromages	Espèces
STEC	Pâte pressée non cuite à affinage court (PPNCC)	Bovin
	Pâte pressée non cuite à affinage court (PPNCC)	Ovin
	Pâte molle à croûte fleurie (PMCF)	Bovin
	Pâte molle à croûte fleurie (PMCF)	Caprin
<i>L. monocytogenes</i>	Pâte molle à croûte lavée (PMCL)	Bovin
	Pâte pressée non cuite à affinage court (PPNCC)	Bovin
	Pâte molle à croûte fleurie (PMCF)	Caprin
	Pâte molle à croûte fleurie (PMCF)	Bovin
<i>Salmonella</i>	Pâte molle à croûte fleurie (PMCF)	Bovin
	Pâte molle à croûte fleurie (PMCF)	Caprin
	Pâte pressée non cuite à affinage court (PPNCC)	Bovin

2.2 Approche retenue pour répondre aux actions A3 et A5.

Afin de répondre aux questions relatives à l'efficacité des mesures de maîtrise (A3) et de performance de l'échantillonnage (surveillance) (A5) sur le risque associé à la consommation de fromages au lait cru, une démarche classique d'évaluation des risques microbiologiques telle que proposée par le *Codex Alimentarius* a été retenue (identification du danger, caractérisation du danger, évaluation de l'exposition et caractérisation du risque) (FAO and WHO 2021).

L'évaluation des risques a tout d'abord estimé quantitativement le niveau de risque associé aux mesures actuelles de maîtrise et de surveillance, ci-après dénommées « scénario de base ». L'évaluation quantitative a permis ensuite de prédire ce qu'il adviendrait du niveau de risque si les mesures de maîtrise et de surveillance étaient modifiées ou si de nouvelles mesures étaient mises en place, ci-après dénommées « scénario à tester ».

L'évaluation quantitative des risques nécessite de recourir à des données et à des modèles mathématiques, ou encore de faire des hypothèses, ce qui génère inévitablement de l'incertitude (Haas, Rose, and Gerba 2014). Les principales incertitudes rencontrées dans cette étude étaient liées :

- au manque de données, compensé par des connaissances des experts ;
- à la simplification par la modélisation mathématique de la propagation de la contamination microbienne aux trois étapes ferme-fabrication-consommateurs. Cette simplification était nécessaire pour éviter une sur-paramétrisation qui aurait engendré encore plus d'incertitude due au manque de données pour estimer précisément l'ensemble des paramètres. Scientifiquement, il est recommandé de bâtir des modèles adaptés à l'objectif (« *fit-for-purpose* ») et parcimonieux (Ratkowsky 2003) ; il est également admis que « *tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles* » (Box 1976) ;
- aux hypothèses biologiques, épidémiologiques et technologiques fondées sur l'expertise ou l'analyse de la littérature. Ces hypothèses nous ont permis de poser la structure du modèle (en d'autres termes d'établir le modèle conceptuel) reliant mesures de maîtrise et de surveillance au risque, mais peuvent induire des approximations, voire des biais. Par exemple, le GT a pu estimer le comportement d'une souche, à partir d'un élément de preuve établi dans la littérature, sur une autre souche de la même espèce, ou encore, définir deux profils d'acidification et les généraliser à l'ensemble des fabrications de fromage de la même catégorie.

L'évaluation quantitative des risques conduite dans cette étude s'appuie sur des distributions de probabilités pour décrire un grand nombre de variables d'entrée du modèle la rendant trop complexe pour être mise en œuvre algébriquement. Elle a donc nécessité l'utilisation de simulations de Monte Carlo (Cassin, Paoli, and Lammerding 1998). Plus précisément, il s'agissait de simulations de Monte Carlo de 2nd ordre (Régis Pouillot and Delignette-Muller 2010) pour distinguer les sources d'incertitude de l'hétérogénéité naturelle (la variabilité¹) de certaines entrées du modèle (par exemple la distribution de la température des réfrigérateurs des consommateurs a été considérée comme une donnée hétérogène ne se résumant pas à une simple moyenne).

Une première simulation de Monte Carlo de 2nd ordre a été faite pour le scénario de base, puis chaque scénario alternatif a fait l'objet d'une simulation particulière. Pour toutes les entrées du modèle décrites par une distribution de probabilité, grâce à la simulation de Monte Carlo de 2nd ordre, il a été possible par analyse de sensibilité de quantifier l'impact des entrées du

¹ La variabilité correspond à l'hétérogénéité naturelle qui ne peut être réduite par des mesures supplémentaires (Thompson 2002).

modèle indépendamment de leurs incertitudes. Cette analyse a été conduite sur le risque sous scénario de base. Enfin, pour les autres entrées du modèle (issues notamment des choix de modèles et des hypothèses), une analyse qualitative de l'incertitude a été effectuée.

L'efficacité des mesures de maîtrise ou de surveillance a été déterminée par comparaison entre le niveau de risque sous un scénario alternatif donné et le niveau de risque sous le scénario de base.

3 Mesures de maîtrise considérées dans le modèle

Afin de sélectionner les mesures de maîtrise² à considérer dans la modélisation, le GT FALC2 s'est tout d'abord appuyé sur la liste des mesures de maîtrise établie par le premier groupe de travail GT FALC (Anses, 2022) à la fois en production primaire, au stade de la fabrication et de la consommation.

De plus, pour les mesures associées au consommateur, le GT FALC2 a auditionné³ les représentants de la DGAI en charge de la réflexion sur la communication des risques liés à la consommation de fromages au lait cru.

Enfin, une revue systématique de la littérature a été conduite en utilisant la démarche PRISMA pour mettre à jour (sur la période 2019 - 2023) les connaissances sur les mesures de maîtrise en production primaire et pendant la fabrication. Cette recherche s'est limitée aux couples fromage/danger pour lesquels une évaluation des risques était réalisée. Quatre bases de données (Scopus, Pubmed, CABAbstract et Web Of Science) ont été interrogées. Les requêtes et filtres utilisés sont présentés dans l'annexe 2. Des documents issus d'autres bases de données (Google Scholar), de la littérature grise et par la méthode « boule de neige » ont également été analysés.

Trois filtres de sélection des études décrivant l'efficacité des mesures de maîtrise ont été retenus :

1. Le premier est la quantification : seules les mesures de maîtrise associées à une évaluation quantitative ont été sélectionnées (estimation d'un « *odds ratio*⁴ », réduction de la prévalence, etc.).
2. Le second est le poids des preuves, en s'appuyant sur la méthode proposée dans le rapport FAO/WHO (FAO and WHO 2022).

Ainsi, trois classes de poids des preuves ont été retenues par le GT pour apprécier l'efficacité des mesures de maîtrise à contrôler les dangers :

- « faible » : étude portant sur peu d'élevages ou d'animaux, s'intéressant à une situation particulière (épidémie ou cas clinique par exemple), dont la méthodologie rend difficile l'interprétation, ou dont l'efficacité de la mesure testée n'est pas confirmée par d'autres études. Les études présentant un poids des preuves « faible » ont été exclues de la sélection ;
 - « moyen » : études basées sur un nombre conséquent d'élevages ou d'animaux, méthodologie clairement définie et fiable, étude de modélisation ;
 - « élevé » : revues systématiques, méta-analyses, essai randomisé contrôlé, et mesures testées/éprouvées en conditions réelles.
3. Le troisième filtre, appliqué aux études présentant des niveaux de preuves « moyen » et « élevé », est la compatibilité de la mesure de maîtrise aux systèmes de production de lait et de fabrication fromagère au lait cru en France. Seules les mesures autorisées, applicables et cohérentes au regard des pratiques rencontrées en France hexagonale ont été retenues dans la liste des mesures de maîtrise à évaluer (à titre d'exemple les

² Actions et activités auxquelles on peut avoir recours pour prévenir ou éliminer un danger qui menace la sécurité des aliments ou pour le ramener à un niveau acceptable. (Anses 2015)

³ Audition du 23 avril 2024

⁴ « *Odds-ratio* » : rapport des cotes de l'exposition chez les cas sur celle des témoins

études portant sur des élevages de plus de 1 000 bovins aux USA n'ont pas été prises en compte).

Concernant la sélection des scénarios de surveillance, le GT FALC2 a considéré plusieurs sources d'information : le recensement des pratiques tiré des travaux de la plateforme de surveillance de la chaîne alimentaire ou d'auditions, les demandes spécifiques du gestionnaire du risque et des aspects réglementaires.

Le GT a pris en compte la surveillance microbiologique à différents stades de la chaîne alimentaire humaine (production primaire, transformation et distribution) car elle est un outil essentiel pour la maîtrise de la sécurité sanitaire des aliments, et donc la protection des consommateurs. Les indicateurs microbiologiques permettent d'estimer la contamination (fréquence et niveau) et de prendre des décisions sur le devenir des animaux, du lait de tank, des lots de fromages en cas de déviation.

3.1 Mesures de maîtrise dans les élevages, de l'animal au lait de tank

3.1.1 STEC

Parmi les mesures de maîtrise établies par le premier groupe de travail GT FALC1, et mises à jour pour la période 2019-2023, les mesures de maîtrise des STEC retenues en appliquant les différents filtres de sélection peuvent être réparties dans les 4 catégories suivantes : (i) l'alimentation des animaux (qualité microbiologique des aliments), (ii) les conditions d'hébergement des animaux (hygiène des locaux) (iii) les conditions de gestion des animaux (introduction de nouveaux animaux) et (iv) la traite (Figure 1)

Concernant l'alimentation, il existe des mesures de maîtrise portant sur la qualité des ensilages et enrubannages : 9 études ont montré que le respect des bonnes pratiques d'ensilage ou d'enrubannage (acidification et anaérobiose) permet de limiter la survie des STEC O157 et O26 (Annexe 3). Les bonnes pratiques permettant une bonne qualité et une bonne conservation de l'ensilage/enrubannage correspondent à une acidification rapide par fermentation majoritairement lactique et un maintien des conditions d'anaérobiose. Le pH nécessaire pour assurer la stabilité microbiologique diffère selon le taux de matière sèche. Pour un ensilage de maïs, par exemple, le taux de matière sèche doit être compris entre 32 et 35 % et le pH doit être inférieur à 4,0. Pour l'enrubannage d'herbe, le pH de stabilité varie de 4,0 à 5,0 suivant le taux de matière sèche (de 20 % à 50 %). Si le pâturage représente également une source de contamination des animaux, il existe beaucoup d'inconnues sur le mode de dissémination et de persistance des STEC dans les pâtures, et sur les mesures de maîtrise associées. Cette voie n'a pas été considérée dans la suite du rapport.

Concernant les conditions d'hébergement des animaux, sept études ont montré que l'hygiène des locaux et le maintien de la qualité des litières (sèches et propres) permettent de réduire la prévalence des ruminants excrétant des STEC O157 (Annexe 3).

Concernant les conditions de gestion des troupeaux, une étude a montré que le fait de ne pas introduire de nouveaux animaux porteurs de STEC représente une mesure de maîtrise permettant de réduire la prévalence des ruminants excrétant des STEC O157 (Annexe 3). Compte tenu de la forte contribution des STEC du sérotype O26:H11 possédant les gènes stx2a et/ou stx2d à l'apparition de cas sporadiques et/ou d'épidémies de SHU en France associés à la consommation de fromages au lait cru contaminés (Anses 2022, 2023), une mesure de maîtrise spécifique de ce type de souche serait donc pertinente. Elle consisterait à

tester les animaux porteurs de STEC du sérotype O26:H11 *stx2a+* et/ou *stx2d+* dans les élevages afin de réduire la prévalence.

Concernant la traite, l'importance de l'hygiène de la traite est bien connue et décrite dans un rapport d'expertise de l'EFSA de 2015, relatif à l'évaluation des risques liés à la consommation de lait cru (EFSA Panel on Biological Hazards 2015). Une étude récente réalisée en France conforte cela en montrant que les opérations de nettoyage de la peau des trayons réduisent le nombre de *E. coli* présents, susceptibles de contaminer ensuite le lait (Annexe 3). Il est à noter que l'efficacité de la plupart de ces mesures de maîtrise a été évaluée sur des souches STEC du sérotype O157:H7 (ou des souches *E. coli* du même sérotype, dépourvues de gènes *stx*). Dans les hypothèses de modélisation, il a été considéré que l'efficacité des mesures de maîtrise vis-à-vis des souches de STEC d'autres sérotypes est équivalente à celle qui a été évaluée sur les souches de STEC du sérotype O157:H7.

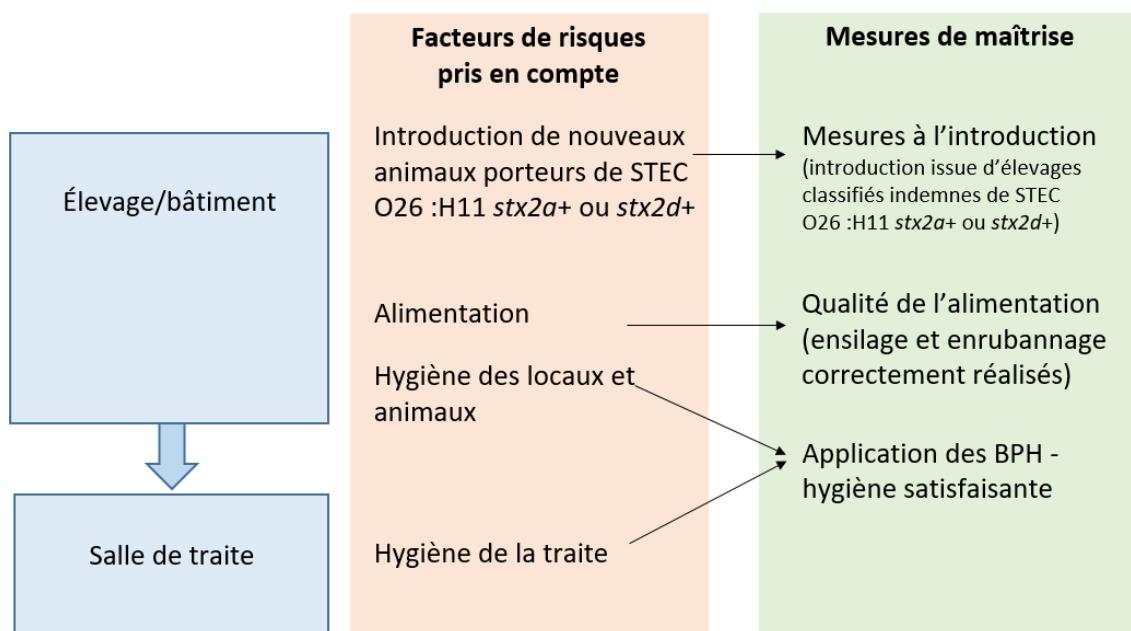


Figure 1 : Synthèse des facteurs de risque pour les STEC au stade de la ferme et mesures de maîtrise correspondantes

En matière de surveillance (Tableau 2), dans la filière où le lait est transformé en entreprise (par opposition à la filière des fromages dits « fermiers ») la surveillance de routine consiste à dénombrer les *E. coli* dans le lait de tank tous les 10 jours. Une surveillance des facteurs de risque de contamination fécale du lait (notamment la propreté des animaux, les épisodes de diarrhée à la mise à l'herbe et les inondations accidentelles dans le bâtiment d'élevage) est également conseillée par l'interprofession (Plateforme de Surveillance de la Chaîne Alimentaire 2022).

En cas de résultats d'analyse non satisfaisants ou non conformes (dépassement d'un seuil de *E. coli* dans le lait, détection de STEC (appartenant aux 5 sérotypes majeurs ou « top 5 ») dans du lait de citerne, un fromage, ou lors d'un contexte sanitaire à risque), une surveillance renforcée est recommandée par l'interprofession laitière. Elle comprend trois actions ; (i) un audit détaillé des pratiques afin que des actions correctives soient réalisées ; (ii) des dénombrements supplémentaires de *E. coli* pour vérifier la maîtrise des bonnes pratiques d'hygiène ; et (iii) une recherche de STEC du top 5 dans le lait de tank et les filtres à lait, voire

sur d'autres sources de contamination (fèces, eau, fourrages, etc.) et d'autres types de prélèvements (lingettes, lavettes, pédichiffonnettes, etc.)-afin de faciliter la détection du ou des élevages dont le lait est contaminé.

Tableau 2 : Surveillance des STEC dans les élevages : synthèse des pratiques actuelles et des scénarios à tester

Stade de surveillance	Cible bactériologique	Pratiques actuelles	Scénario de base**	Scénarios à tester
Troupeaux	STEC	Pas de connaissance du statut des troupeaux*	PA	Troupeaux indemnes de STEC O26:H11 <i>stx2a+</i> et/ou <i>stx2d+</i> : pas d'import d'animaux provenant de fermes non-indemnes de ce type de bactéries
Lait à la ferme	STEC	Pas de recherche en routine	PA	<u>Recherche si dépassement du critère <i>E. coli</i> :</u> En même temps que les prélèvements pour dénombrement de <i>E. coli</i>), recherche dans le lait de tank (n = 1) En même temps que les prélèvements pour dénombrement de <i>E. coli</i>), recherche sur les filtres à lait (n = 1) Durée de cette surveillance : 3 mois Si résultat STEC positif : exclusion des tanks de la ferme sur 10 jours et début d'une nouvelle période de surveillance renforcée (3 mois)

*pas de surveillance pour les animaux pour les STEC ; ** PA, pratiques actuelles

3.1.2 *Salmonella*

Le GT propose suivant les recommandations du premier rapport (Anses 2022) d'explorer des mesures générales aux différents sérovars de *Salmonella* et d'autres spécifiques (pour la seule filière bovine) au sérovar Dublin.

Les mesures de maîtrise des bactéries du genre *Salmonella* sélectionnées par le GT FALC2 peuvent être réparties dans les trois catégories suivantes : (i) les conditions de gestion du troupeau (gestion des cas cliniques, introduction de nouveaux animaux et mise à l'écart des animaux malades ou fortement excréteurs), (ii) les conditions d'hébergement des animaux (hygiène des locaux) et (iii) l'hygiène de la traite (Annexe 3).

Un vaccin⁵ est autorisé en France et son indication est la prévention clinique (des avortements notamment), mais cette vaccination n'empêche pas complètement l'excration de la bactérie dans les matières fécales (Delafosse et al. 2018). D'autre part, la vaccination déclenche la production d'anticorps et ne permet plus de recourir au test sérologique permettant de suivre la séroprévalence. Cette mesure de maîtrise n'est donc pas retenue ici.

(i) Conditions de gestion du troupeau

Concernant la gestion du troupeau, la gestion des cas de salmonelloses cliniques est essentielle à la prévention de la contamination des tanks (T. Nielsen et al. 2010). Les animaux présentant des signes cliniques de salmonellose doivent être écartés du troupeau et leur lait ne peut être collecté.

⁵ <https://www.ircp.anmv.anses.fr/rcp.aspx?NomMedicament=SALMOPAST>

D'autre part, une étude danoise (Jordan, Nielsen, and Warnick 2008) a démontré par modélisation l'effet de différentes mesures de maîtrise de *S. Dublin* à l'introduction de nouveaux animaux, incluant différentes pratiques de renouvellement (introduction moins fréquente d'animaux, de plus petits lots, ou issus d'élevages à faible risque) et le dépistage des nouveaux animaux introduits. Par la suite en 2008, un programme d'éradication de *S. Dublin* en élevage laitier a été initié au Danemark (Jordan, Nielsen, and Warnick 2008). Il repose sur une classification des élevages (indemnes/non indemnes), sur la base d'une sérologie sur les laits de tank réalisée trois fois par an. Ainsi, les élevages classifiés indemnes ne peuvent importer des bovins que depuis d'autres élevages indemnes. En effet, l'importation d'animaux a été décrite comme l'un des principaux facteurs de risque de re-contamination des élevages par *S. Dublin* (L.R. Nielsen et al. 2004). Ce programme a permis de réduire la prévalence des troupeaux positifs de 25 % à 6 % entre 2015 et 2023, avec néanmoins une remontée à 11,5 % en 2023 due notamment à la difficulté de mettre en œuvre la restriction des mouvements d'animaux (T.D. Nielsen et al. 2012; Conrady et al. 2024).

En complément, une autre étude de la même équipe danoise a évalué l'efficacité d'une surveillance renforcée au sein de 10 élevages laitiers classifiés non indemnes dans le cadre du programme danois d'éradication de *S. Dublin* (L.R. Nielsen and Nielsen 2012). En sus du test sérologique sur les laits de tank, l'étude prévoyait un test sérologique individuel du lait des vaches laitières quatre fois par an, ainsi qu'un test (sérologie sanguine) deux fois par an des jeunes animaux (veaux femelles et génisses). La surveillance renforcée a permis de définir et mettre en œuvre des mesures de maîtrise spécifiques à chaque élevage, reposant généralement sur la réforme (dès que possible) des vaches fortement excrétrices et la séparation, dès le vêlage, des veaux issus de vaches excrétrices. Ces mesures se sont avérées efficaces puisque l'infection de neuf des 10 troupeaux suivis a pu être maîtrisée (le troupeau a retrouvé son statut indemne). À noter qu'il aura fallu en moyenne trois ans pour maîtriser l'infection dans les troupeaux concernés.

(ii) Conditions d'hébergement des animaux

Concernant les conditions d'hébergement des animaux, une étude américaine (Losinger et al. 1995) a quantifié l'effet de l'utilisation d'une zone de vêlage dédiée, en particulier pour les primipares. Une autre étude (H.C. Davison et al. 2006a) a quantifié l'effet de différentes mesures d'hygiène des locaux (par ex. l'utilisation d'une zone de parking propre pour les visiteurs de l'élevage). Cette mesure est valable pour l'ensemble des sérovars de *Salmonella*.

(iii) Hygiène de la traite

Une étude (Ruzante et al. 2010) a quantifié l'effet de l'amélioration de l'hygiène de la traite (par ex. port de gants latex ou nitrile, décrochage automatique des gobelets trayeurs, formation du personnel de traite).

Sur la base de la bibliographie disponible, des recommandations du premier groupe de travail (Anses, 2022) et de l'existence de mesures de maîtrise spécifiques à *S. Dublin*, le GT propose de différencier *Salmonella* spp. de *S. Dublin*.

La Figure 2 et le Tableau 3 recensent l'ensemble des mesures de maîtrise liées à *Salmonella* spp. et *S. Dublin*.

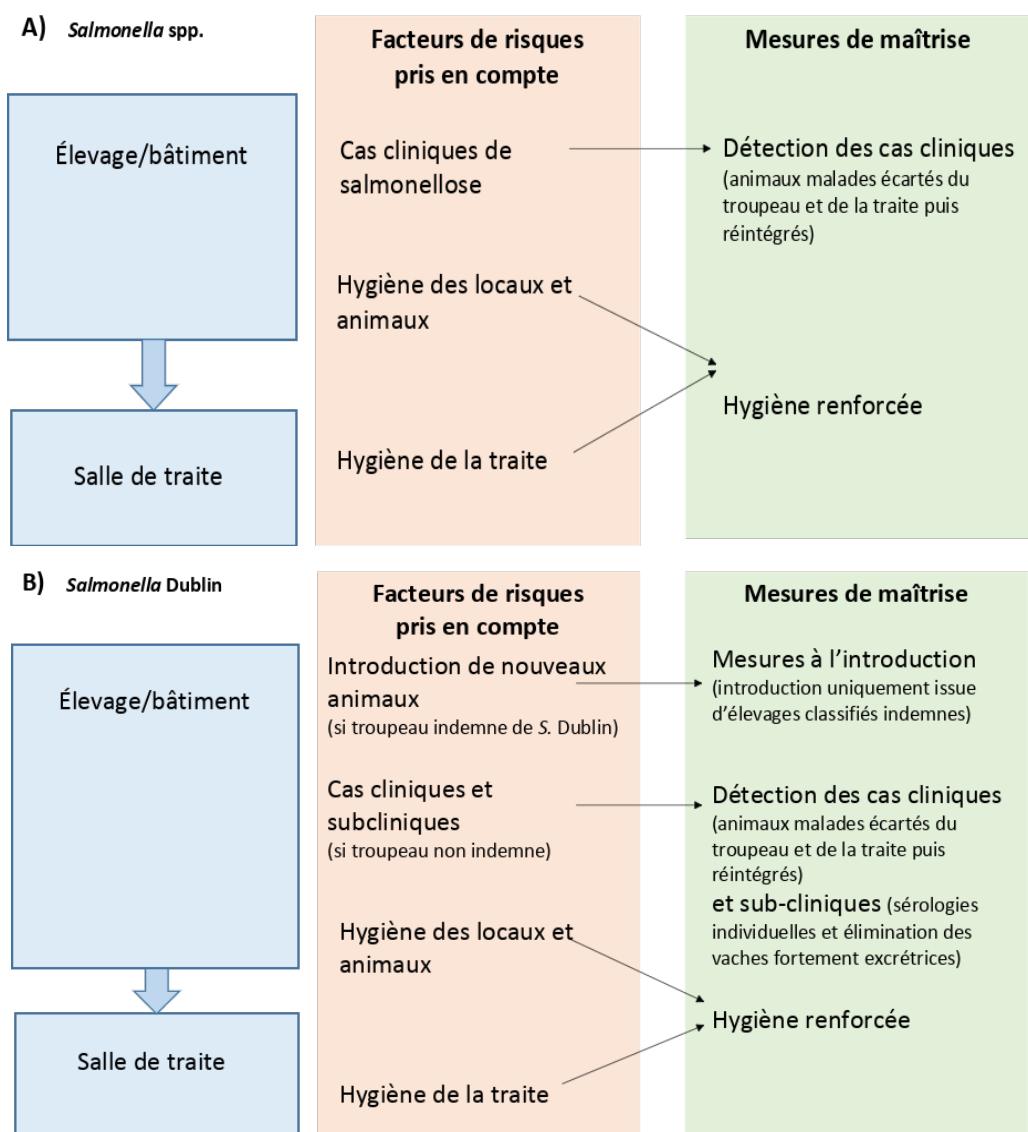


Figure 2 : Synthèse des facteurs de risques pour *Salmonella* spp. (A) et *Salmonella* Dublin (B) au stade de la ferme et mesures de maîtrise correspondantes

Tableau 3. : Surveillance de *Salmonella* dans les élevages : synthèse des pratiques actuelles et des scénarios à tester

Stade de la surveillance	Cible bactériologique	Pratiques actuelles	Scénario de base	Scénarios à tester
Animaux	<i>Salmonella</i> Dublin	Pas de surveillance	PA	Troupeaux non indemnes : recherche individuelle de la bactérie (trimestrielle) et réforme des vaches fortement excrétrices
	<i>Salmonella</i> (salmonellose clinique)	Surveillance quotidienne des animaux et exclusion de l'animal de la traite si symptômes	PA	La détection de cas cliniques déclenche une surveillance renforcée des laits (tanks, citernes)
Troupeaux	<i>Salmonella</i> Dublin	Pas de connaissance du statut des troupeaux	PA	Surveillance trimestrielle des tanks (sérologie) issus de tous les troupeaux (classification indemne/non indemne)

				Troupeaux indemnes : pas d'import d'animaux provenant de fermes non-indemnes
Lait à la ferme	Salmonella spp.	Pas de recherche en routine	PA	<p><u>Recherche si dépassement du critère <i>E. coli</i> :</u></p> <p>Recherche de <i>Salmonella</i> dans le lait de tank (n = 1)</p> <p>Recherche sur les filtres à lait</p> <p>Durée de cette surveillance : 3 mois (recherche réalisée en même temps que les prélèvements pour dénombrement de <i>E. coli</i>)</p> <p>Si <i>Salmonella</i> positif : exclusion des tanks de la filière lait cru sur 10 jours et début d'une nouvelle période de surveillance renforcée (3 mois)</p>

3.1.3 *L. monocytogenes*

Parmi les mesures de maîtrise établies par le premier groupe de travail GT FALC1, et mises à jour pour la période 2019-2023, les mesures de maîtrise de *L. monocytogenes* sélectionnées en appliquant les différents filtres peuvent être réparties dans les trois catégories suivantes : (i) les conditions de gestion des animaux (détection des mammites sub-cliniques) (ii) l'alimentation des animaux (qualité microbiologique des aliments), et (iii) la traite (hygiène des locaux et des équipements) (Figure 3).

Concernant les conditions de gestion des animaux, trois études mentionnent les mammites sub-cliniques à *L. monocytogenes* comme source de contamination du lait de bovins ou de caprins (Annexe 3). Ces études suggèrent que le dépistage des mammites subcliniques pourrait servir de mesure de maîtrise pour réduire la prévalence de *L. monocytogenes* dans les laits de tank. Papić et al. (Papić et al. 2019) ont décrit l'occurrence des mammites sub-cliniques dans une ferme slovène comportant 18 génisses et 50 vaches laitières et ont observé une forte occurrence (19 %) de mammites sub-cliniques liées à *L. monocytogenes*. La dernière étude disponible en France date de 1998 et indique que la fraction de troupeaux atteints de mammites à *L. monocytogenes* était de 10 % (Bemrah et al. 1998).

Concernant l'alimentation des animaux, les études ont indiqué qu'un ensilage/enrubannage mal conduit (ou mal réalisé) est considéré comme une des sources principales de contamination par *L. monocytogenes* (Annexe 3).

Sept études ont attribué la présence de *L. monocytogenes* dans le lait de tank et les filtres à lait de tank à une contamination fécale au cours du processus de traite et/ou à des processus de nettoyage et d'assainissement inefficaces, pouvant conduire à la formation d'un biofilm dans l'équipement de traite (Annexe 3).

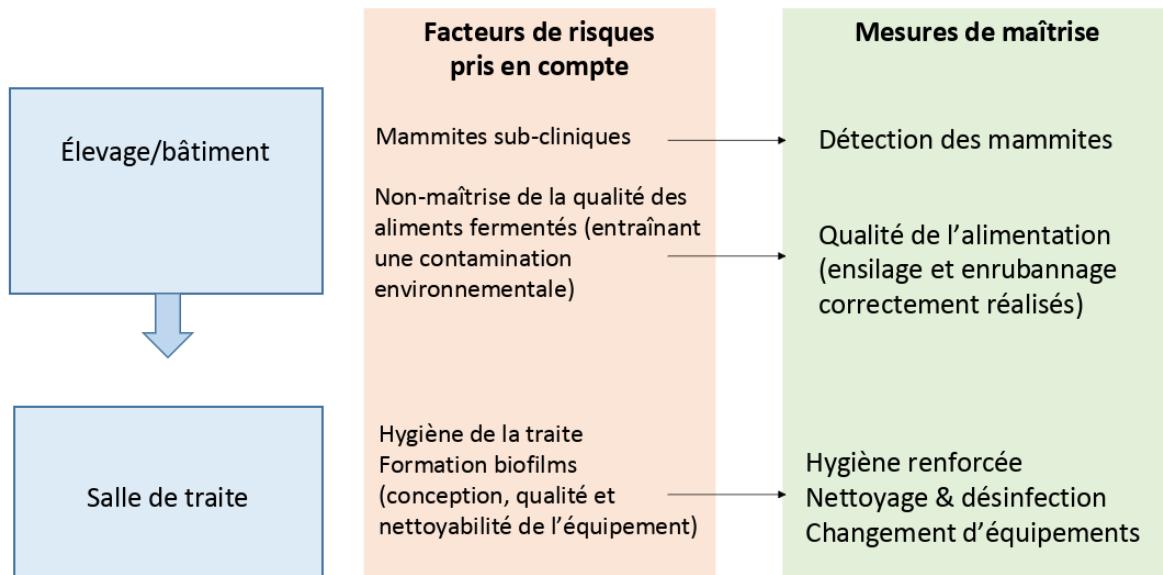


Figure 3 : Synthèse des facteurs de risque pour *L. monocytogenes* au stade de la ferme et mesures de maîtrise correspondantes

La surveillance de *L. monocytogenes* au niveau des élevages constitue un levier pour la maîtrise du risque de contamination du lait cru. À ce jour, cette surveillance repose principalement sur des approches indirectes (par exemple par le suivi des cellules somatiques) de détection des mammites subcliniques. Une mesure de surveillance pourrait viser une détection ciblée des mammites subcliniques associées à *L. monocytogenes*. Le renforcement de la surveillance pourrait passer par l'introduction de recherches régulières de *L. monocytogenes* dans le lait de tank ou dans les filtres à lait, permettant une détection plus rapide des contaminations et la mise en œuvre de mesures correctives ciblées. Le Tableau 4 présente une synthèse des pratiques actuelles et des scénarios à tester.

Tableau 4 : Surveillance de *L. monocytogenes* dans les élevages : synthèse des pratiques actuelles et des scénarios à tester

Stade de surveillance	Pratiques actuelles	Scénario de base*	Scénarios à tester
Animaux	Surveillance indirecte sur PA mammites sub-cliniques		Surveillance stricte conduisant à la détection systématique des mammites à <i>L. monocytogenes</i>
Lait à la ferme	Pratiques variables selon les filières, les entreprises	Pas de recherche	Recherche de <i>L. monocytogenes</i> trimestrielle (filtre) Si positif : exclusion des tanks de la ferme de la filière lait cru. Réintégration si l'analyse suivante est conforme

* PA : pratiques actuelles

3.1.4 Suivi des indicateurs microbiologiques

La surveillance à la ferme pour la production de fromages au lait cru peut concerner différents éléments de la chaîne de production, notamment les animaux, le lait de tank et les filtres à lait. La première étape de la surveillance microbiologique concerne les animaux producteurs de lait notamment par l'attention particulière portée aux mammites ou à l'apparition d'autres pathologies chez les animaux. La quantification et la détection d'indicateurs ou d'agents pathogènes dans leur lait ou leurs matières fécales est une mesure de maîtrise applicable mais peu pratique. Des échantillons de lait de tank peuvent être prélevés régulièrement pour des analyses microbiologiques afin de détecter la présence d'agents pathogènes ou de suivre des indicateurs d'hygiène. Le lait de tank étant un mélange, il offre une vue d'ensemble de la qualité de l'hygiène et du lait d'un troupeau. La qualité microbiologique des filtres à lait utilisés lors de la collecte et du traitement du lait peut également être surveillée. Ces filtres capturent les particules et les débris, et peuvent également retenir et concentrer des micro-organismes présents dans le lait. En analysant les laits de tank et les filtres, il est possible de détecter des signes précoce de contamination et de prendre des mesures correctives⁶ avant que les agents pathogènes n'atteignent des seuils critiques (de détection ou de quantification).

Actuellement, les pratiques de surveillance microbiologique à la ferme incluent des tests effectués à intervalles réguliers pour évaluer la qualité microbiologique du lait au travers de l'indicateur *E. coli*. En cas de détection de niveaux élevés, les fermes peuvent être exclues temporairement de la chaîne de production en lait cru. Ces exclusions sont généralement basées sur des seuils spécifiques, tels que la présence de 100 unités formant colonies (ufc) par millilitre. Des scénarios envisagés pour optimiser cette surveillance incluent l'augmentation de la fréquence des tests afin d'identifier plus rapidement les problèmes potentiels, ainsi que la diminution des valeurs d'exclusion, passant de 50 à 10 ufc/mL.

3.2 Mesures de maîtrise et de surveillance pendant la transformation fromagère

3.2.1 Mesures de maîtrise pendant la transformation

Après application des différents filtres de sélection sur les mesures de maîtrise identifiées par le premier groupe de travail GT FALC et mises à jour pour la période 2019-2023, des mesures de maîtrise possibles ont été identifiées pour une application pendant la fabrication des fromages. Ces leviers sont dépendants des technologies de fabrication. Ils concernent le choix des ferment, la conduite de l'affinage et les bonnes pratiques d'hygiène dans l'atelier (Figure 4).

- **Choix des bactéries acidifiantes**

Concernant les fromages à pâte molle, les cinq études détaillées dans le tableau A3.2 en Annexe 3 montrent que le respect des cibles de pH à atteindre pendant les phases de coagulation et d'égouttage (pH cible < 6,5 en moins d'une heure puis pH < 4,8 en moins de 24 h) permet de limiter efficacement la croissance des bactéries pathogènes. Ainsi, le choix des bactéries acidifiantes est primordial. Trois études montrent que certains consortiums de bactéries lactiques entrent en compétition avec *L. monocytogenes* de manière plus efficace

⁶ Action pré-établie visant à éliminer la cause d'une non-conformité ou d'une autre situation indésirable détectée lors d'une surveillance (Anses, 2015).

que d'autres, ce qui engendre un niveau de population de cet agent pathogène significativement plus bas en fin de production.

De nombreuses études (cf. tableau A.3.2 en annexe 3) ont également montré que le respect des valeurs cibles de pH pendant les phases de coagulation et d'égouttage (pH < 5,8 en 6 h) pour les fromages de type PPNC à affinage court est important pour limiter le développement des agents pathogènes. Plusieurs études montrent que la présence de bactéries lactiques aux propriétés fortement acidifiantes (baisse jusqu'à un pH de 5,2) dans ces fromages permet de mieux limiter la croissance de *L. monocytogenes*.

- **Conduite de l'affinage**

Les fromages à pâte molle ont un faible pouvoir tampon. Notamment par la consommation de l'acide lactique, le développement de la flore technologique de surface entraîne une remontée du pH en surface des fromages à des valeurs supérieures à 7 au bout de 25-30 jours d'affinage. Ainsi, les deux leviers possibles pour ces fromages à ce stade sont i) la maîtrise des recontaminations de la surface des fromages par *L. monocytogenes* via l'environnement de production (M.C. Carnio, Höltzel, et al. 2000) et ii) l'utilisation de souches impliquées dans la fabrication du fromage permettant en plus d'inhiber la croissance de *L. monocytogenes* quand le pH remonte à des valeurs neutres. Sept études (tableau A3.2 en annexe 3) montrent que l'utilisation d'une souche productrice de molécules inhibitrices (ex. bactériocine(s)) permet d'obtenir une moindre concentration de *L. monocytogenes* en fin d'affinage. Les souches productrices concernées sont par exemple des *Lactiplantibacillus plantarum*, *Enterococcus faecium* ou *Lactococcus lactis*.

Pour les fromages à pâte pressée non cuite, la durée de l'affinage peut être un levier de maîtrise pour certains agents pathogènes. Les niveaux des populations de *Salmonella* et de STEC restent stables ou diminuent dans l'ensemble du fromage au-delà de 10 jours d'affinage. Sous réserve d'une préservation des qualités organoleptiques, un allongement de la durée de l'affinage est donc efficace pour réduire les populations de ces deux agents pathogènes. En revanche, certaines études montrent que *L. monocytogenes* peut se développer durant les 8 à 10 premiers jours d'affinage et même jusqu'à 25 jours. La population de *L. monocytogenes* ne commence à décroître que pour des temps d'affinage plus longs. Ainsi, le GT n'a pas considéré la durée d'affinage comme une mesure de maîtrise efficace pour *L. monocytogenes* dans les fromages de type PPNC à affinage court.

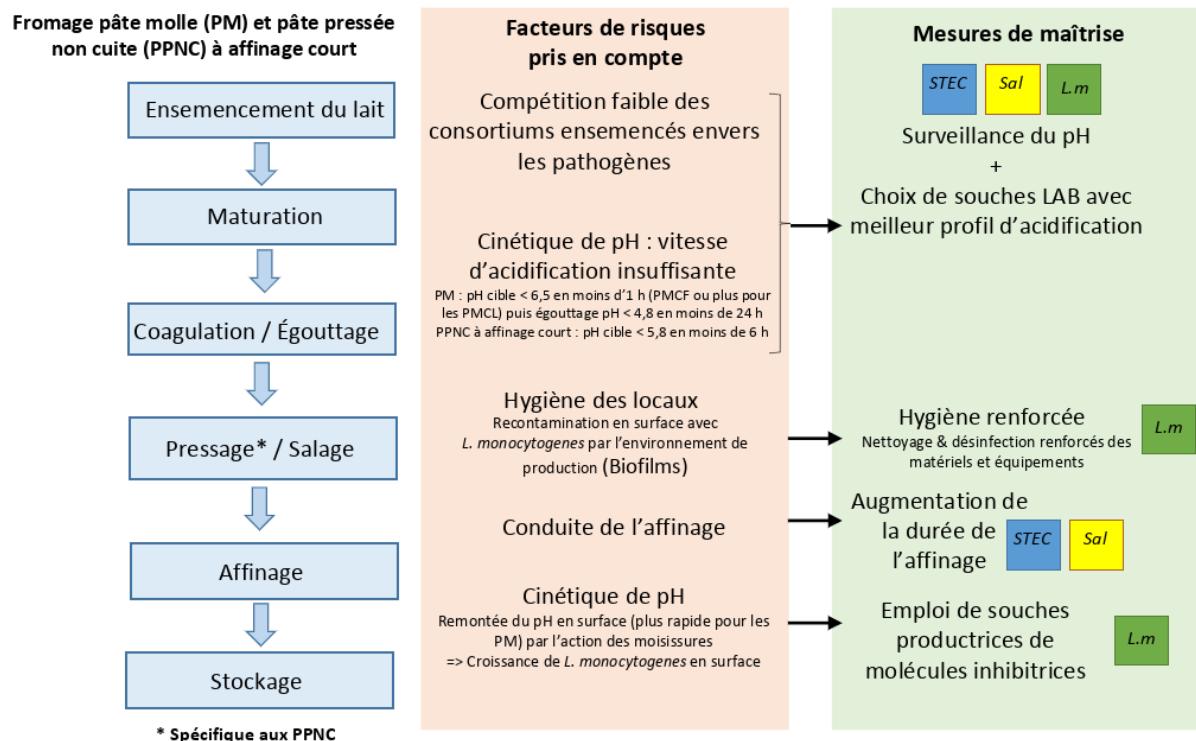


Figure 4 : Synthèse des facteurs de risques et des mesures de maîtrise correspondantes pour la fabrication des fromages à pâte molle et à pâte pressée non cuite à affinage court

(légende : Sal : *Salmonella*, L.m : *L. monocytogenes*) LAB : bactéries lactiques

3.2.2 Surveillance microbiologique en cours de fabrication ou sur les produits finis

3.2.2.1 Les critères microbiologiques

Le plan d'autocontrôle microbiologique (surveillance microbiologique), défini par un exploitant du secteur alimentaire, doit s'intégrer dans une démarche de maîtrise de la sécurité sanitaire des aliments. Ce plan d'autocontrôle concerne l'environnement de fabrication et les denrées. Il est un volet important du plan de maîtrise sanitaire (PMS) dans lequel sont détaillés les différents lieux de prélèvement, la fréquence, les méthodes de prélèvement, ainsi que les méthodes d'analyse et les modalités d'exploitation des résultats.

Le plan d'autocontrôle microbiologique portant sur les denrées, éventuellement libératoire, est défini sous la responsabilité de l'exploitant sur la base d'une analyse pertinente des dangers dans le cadre du PMS. Il concerne *a minima* le produit fini mais peut également porter sur les matières premières et les produits intermédiaires. Il est à noter que le règlement (CE) n° 2073/2005, concernant les critères microbiologiques applicables aux denrées alimentaires, définit deux types de critères microbiologiques :

- les critères de sécurité définissent l'acceptabilité d'un produit ou d'un lot de denrées alimentaires. Ils sont applicables aux produits mis sur le marché jusqu'à la fin de leur durée de vie⁷. Si la denrée alimentaire n'est pas conforme au critère de sécurité, elle est considérée comme dangereuse et ne peut dès lors pas être mise sur le marché en l'état ;

⁷ [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=PI_COM:C\(2024\)7974](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=PI_COM:C(2024)7974)

- les critères d'hygiène des procédés indiquent l'acceptabilité du fonctionnement du procédé de production. Il fixe une valeur indicative de contamination dont le dépassement exige des mesures correctives destinées à maintenir l'hygiène du procédé, conformément à la législation sur les denrées alimentaires. Le dépassement d'un critère d'hygiène des procédés ne permet pas de conclure sur la conformité ou non d'un produit et n'empêche pas la mise sur le marché de ce dernier.

3.2.2.2 La fréquence d'échantillonnage

Ce même règlement laisse également une certaine latitude aux professionnels pour définir des procédures d'échantillonnage, des fréquences ou des méthodes d'essai différentes de celles fixées dans le règlement. Cette démarche non prescriptive est soulignée dans l'article 4 et l'article 5 de ce règlement. En effet, les exploitants du secteur alimentaire décident des fréquences d'échantillonnage appropriées à appliquer, sauf lorsque l'annexe I du règlement (CE) n°2073/2005 prévoit des fréquences particulières. Dans ce cas, la fréquence d'échantillonnage sera au moins celle prévue à l'annexe I. Cette fréquence d'échantillonnage peut être adaptée à la nature et à la taille des établissements.

En effet, en ce qui concerne la surveillance microbiologique, il est apparu nécessaire de différencier les pratiques appliquées lors de la fabrication industrielle de celles mises en œuvre lors de productions artisanales (dites « fermières »). Ces deux environnements de production présentent des caractéristiques distinctes qui influencent directement les protocoles de surveillance microbiologique, notamment en termes de fréquence d'échantillonnage.

En industrie fromagère, les capacités de production sont élevées et les entreprises utilisent des chaînes de fabrication souvent automatisées. La régularité des processus permet une approche systématique et fréquente de l'échantillonnage.

Dans le contexte de la transformation fermière, les productions se font à de plus petites échelles. Cela n'implique pas une moindre importance de la surveillance, mais nécessite une adaptation de celle-ci pour tenir compte des spécificités des types de production fermière. C'est pourquoi le nombre d'unités à prélever suivant les plans d'échantillonnage définis à l'annexe I peut être réduit si l'exploitant est en mesure de démontrer, au travers de l'historique de ses résultats d'autocontrôles, que les procédures prévues par son PMS sont efficaces. Si l'échantillonnage est ainsi réduit, les résultats des autocontrôles ne permettent plus de juger de l'acceptabilité d'une production donnée. C'est la succession des résultats dans le temps qui dessine progressivement des tendances, sur plusieurs semaines voire plusieurs mois. Ainsi, les exploitants du secteur alimentaire peuvent utiliser d'autres procédures d'échantillonnage et d'essai lorsqu'ils sont en mesure de démontrer, sous réserve de pouvoir démontrer aux autorités compétentes que ces procédures fournissent des garanties au moins équivalentes à celles prévues par le règlement (CE) n°2073/2005.

Des agents pathogènes ne faisant pas l'objet d'un critère de sécurité dans le règlement (CE) n°2073/2005 peuvent être recherchés et éventuellement dénombrés pour une denrée alimentaire, et ceci en se basant sur des références historiques ou scientifiques. En effet, certains agents pathogènes sont fréquemment à l'origine d'alertes ou particulièrement préoccupants en termes de santé publique sans pour autant faire l'objet de critère de sécurité réglementaire. À des fins d'harmonisation nationale, le guide de gestion des alertes d'origine alimentaire de la DGAI propose une liste de critères de sécurité « *non réglementaires* » pour *Salmonella* spp., *L. monocytogenes* et *E. coli* STEC, en plus de ceux fixés par le règlement (CE) n°2073/2005 (DGAI 2023)

Dans la suite de ce rapport, le GT a examiné les protocoles de surveillance microbiologique spécifiques à chaque contexte de production, en soulignant les adaptations nécessaires pour renforcer la sécurité et la qualité des produits, tout en tenant compte des réalités opérationnelles distinctes des entreprises industrielles et des exploitations fermières.

3.2.2.3 La surveillance microbiologique du lait et des fromages au lait cru

La surveillance (indicateurs d'hygiène, agents pathogènes) peut être effectuée au niveau des laits. Les entreprises réalisent des dénombrements d'*E. coli* dans les laits collectés (lait du camion-citerne, mélange de laits issus de différents élevages) et ceux mis en production. Sur les bases des pratiques recensées par la plateforme de la surveillance de la chaîne alimentaire, le GT propose un scénario qui retiendrait une limite plus basse (10 ufc/mL) que dans le scénario de base (50 ufc/mL). Une recherche des trois agents pathogènes retenus dans cette étude n'est actuellement pas systématiquement réalisée dans ces laits. Elle est souvent conditionnée à un contexte de surveillance renforcée. Le GT propose un scénario dans lequel les pathogènes seraient rechercher pour l'ensemble des lots de laits mis en fabrication.

Pendant la fabrication, la surveillance de ces trois agents pathogènes est plus efficace lorsque la recherche se fait au pic de la contamination. Pour STEC et *Salmonella*, il est ainsi plus judicieux de les rechercher en fin d'égouttage, alors qu'il est plus pertinent de rechercher *L. monocytogenes* en fin d'affinage. En cas de détection, les lots ne sont pas mis sur le marché. Le scénario de base retenu par le GT considère que 60 % des entreprises recherchent STEC sur 100 % des lots ($n = 1$ au pic de la contamination) et que 100 % des entreprises recherchent *L. monocytogenes* en fin d'affinage ($n = 5$) sur 50 % des lots (Tableau 5).

Pour la surveillance de STEC au cours du procédé de fabrication, le GT a choisi de tester les deux scénarios alternatifs suivants :

- 100 % des entreprises testent 100 % des lots avec $n = 1$ en fin d'égouttage ;
- 100 % des entreprises testent 100 % des lots avec $n = 5$ en fin d'égouttage.

Pour la surveillance de *Salmonella*, le GT a choisi un scénario alternatif où 100 % des entreprises testent 100 % des lots avec $n = 5$ en fin d'égouttage.

Enfin pour la surveillance de *L. monocytogenes* en fabrication, le GT a choisi de tester un scénario alternatif où 100 % des entreprises testent 100 % des lots avec $n = 5$ en fin d'affinage.

Dans le cas particulier de la filière des fromages fermiers, où le lait est produit et transformé sur place (à la ferme), il n'y a pas de recherche de STEC (ni dans le lait, ni dans les fromages) et seules des analyses de dénombrement de *E. coli* sont réalisées plus ou moins fréquemment à partir du lait mis en production. Le non-respect du critère d'hygiène *E. coli* conduit à la mise en place d'une surveillance renforcée (selon les recommandations de l'interprofession), comprenant par exemple la réalisation d'un audit de l'élevage et/ou la recherche de STEC conduisant potentiellement au retrait du lot de fromage.

L'ensemble des scénarios à tester est résumé dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Scénarios de surveillance microbiologique dans le cadre de la transformation fermière ou industrielle

Stade de la surveillance	Cible bactériologique	Pratiques actuelles	Scénario base	Scénarios à tester
Lait mis en production fromagère	<i>E. coli</i> (critère d'hygiène)	Fromage fermier : pas ou peu de surveillance	Fermier : pas de surveillance	Fermier : Surveillance <i>E. coli</i> tous les 10 jours (seuil 50 ufc/mL)
		Fromage industriel : quantification systématique. Exclusion du lait de tank concerné par le dépassement de la valeur seuil (50 ufc/mL)	Industriel : PA	Industriel : Ablissement du seuil (10 ufc/mL)
		STEC	Pas de recherche en routine	Recherche dans le lait n=1 tous les lots Recherche sur les filtres à lait n = 1 tous les lots Si résultat STEC positif : orientation du lot de lait vers d'autres productions
	<i>Salmonella</i>	Les pratiques sont variables en fonction des entreprises et des types de fromages	Pas de recherche	Recherche dans le lait Recherche sur les filtres n = 1 tous les lots Si positif : orientation du lot de lait vers d'autres productions
		<i>L. monocytogenes</i>	Les pratiques sont variables en fonction des entreprises et des types de fromages	Pas de recherche
		STEC	Une partie des entreprises font une recherche (enquête plateforme SCA 60 % ⁸)	60 % des entreprises : n = 1 systématique 40 % des entreprises : n = 0
	<i>Salmonella</i>	Les pratiques sont variables en fonction des entreprises et des types de fromages	% entreprise : 100 % % lot : 50% n= 5	Scenario #1 % entreprise : 100% % lot : 100% n = 1 Scenario #2 % entreprise : 100 % % lot : 100 % n = 5
		<i>L. monocytogenes</i>	Les pratiques sont variables en fonction des entreprises et des types de fromages	% entreprise : 100 % % lot : 50% n = 5 en fin d'affinage
				Scenario #1 %entreprise : 100 % % lot : 100 % n = 5 en fin d'affinage

* PA, pratiques actuelles

⁸ <https://www.plateforme-sca.fr/page/surveillance-de-stec-en-filiere-de-fabrication-de-fromages-au-lait-cru>

3.3 Mesures de maîtrise en lien avec les consommateurs

En se basant sur l'avis de l'Anses de 2022 (Anses, 2022) relatif aux modalités de maîtrise du risque lié à la présence de dangers microbiologiques dans les fromages et autres produits laitiers fabriqués à partir de lait cru, une liste de mesures de maîtrise en lien avec le consommateur a été sélectionnée. Cette liste peut être répartie en deux grandes catégories : (i) politiques d'éviction à destination des populations sensibles, et (ii) mesures générales d'hygiène applicables par le consommateur.

Pour ce qui relève du volet éviction alimentaire à destination des populations sensibles, la première mesure retenue par ce GT consiste à appliquer l'éviction de consommation des fromages au lait cru aux enfants de moins de 5 ans comme scénario de base compte tenu du risque lié aux STEC (Figure 5). En effet, le ministère de l'agriculture a retenu cette limite de 5 ans au niveau du *vade-mecum* « restauration collective »⁹. Ce *vade-mecum* sectoriel précise au niveau de l'item « *Analyse des dangers complète et pertinente pour l'activité considérée* » que le lait cru et les fromages au lait cru présentent un « *sur-risque important* » d'infection bactérienne chez l'enfant, surtout pour les moins de 5 ans. Les fromages au lait cru à pâte pressée cuite tels que le Gruyère, le Comté, l'Emmental ou le Beaufort ne sont pas concernés par ces recommandations d'éviction à la consommation selon ce *vade-mecum* sectoriel. Cette recommandation appliquée en restauration collective n'est pas toujours connue par le grand public et notamment les parents. Cette situation définit le scénario de base.

A cet effet, trois scénarios peuvent être envisagés afin d'évaluer le risque associé à la consommation des fromages au lait cru par les enfants, en faisant varier les mesures d'éviction en fonction de l'âge des enfants : moins de 3 ans, moins de 5 ans et moins de 10 ans (Figure 5).

La deuxième mesure d'éviction alimentaire à évaluer concerne la catégorie des femmes enceintes, compte tenu du risque lié à *L. monocytogenes* (Figure 5). Aujourd'hui, l'information concernant l'éviction alimentaire destinée aux femmes enceintes est pour l'essentiel assurée par les professionnels de santé lors des consultations au cours de la grossesse ce qui n'est pas ou peu efficace (Anses 2014).

La troisième et dernière mesure d'éviction alimentaire retenue par le GT concerne la catégorie des personnes âgées de 65 ans et plus et la catégorie des personnes immunodéprimées (Figure 5), vis-à-vis des dangers *Salmonella* spp (Anses 2019) et *L. monocytogenes* (R. Pouillot et al. 2015). Cette mesure d'éviction alimentaire pour ces catégories vis-à-vis des STEC n'a pas été retenue. En effet, les souches isolées de cas de SHU adultes appartiennent le plus fréquemment à des sérogroupes autres que ceux du « top 5 », tels que O91, O171, O174 et O148 (Anses 2023). Ces derniers sérogroupes sont rarement détectés dans les produits laitiers ou chez les ruminants (EFSA and ECDC 2022, 2023, 2024). Par ailleurs, les facteurs liés à l'hôte (tels que l'âge, le statut immunitaire, la prise d'antibiotiques, le microbiote) ont également un effet sur la sévérité des formes cliniques des infections à STEC, et il est difficile de prendre en compte ces éléments, faute d'informations cliniques détaillées (comorbidités, etc.) (Anses 2023).

Pour ce qui relève du volet mesures générales d'hygiène applicables par le consommateur, les mesures de maîtrise à évaluer concernent le respect des températures de réfrigération et

⁹ DGAL, *Vade-mecum sectoriel restauration collective*, version octobre 2024
<https://agriculture.gouv.fr/telecharger/129253?token=2fbc36dba6ef2eab694e8eb0aa6ca7176190b931ca70313477f20ff697cbe7bb>

des dates de consommation établies sous la responsabilité des fabricants (date limite de consommation ou date de durabilité minimale). En effet, les fromages au lait cru sont des produits principalement destinés à être consommés en l'état. De ce fait, ces denrées alimentaires sont soumises à une réglementation vis-à-vis de *L. monocytogenes* tout au long de la durée de vie (CE n°2073/2005).

L'étude INCA3 a permis de recueillir des informations concernant la distribution des températures dans les réfrigérateurs des ménages. Deux scénarios seront testés. Le premier correspond à une situation idéale de conservation à 4 °C, le second scénario est celui d'une conservation à 8 °C maximum par les ménages. Dans le scénario de base (température INCA3) et les deux scénarios à tester, une remontée de température systématique des portions avant la consommation d'une durée de 2 heures à 20 °C, est prise en compte. (Figure 5).

L'étude INCA3 a également permis de recueillir des informations sur les comportements alimentaires relatifs au dépassement des dates de consommation pour les produits préemballés ou non, destinés au consommateur final (Anses 2017). Les données d'INCA3 seront utilisées pour le scénario de base. Dans le scénario alternatif, des dépassements de 3, 7 et 10 jours seront testés. De plus l'impact du respect des dates figurant sur l'étiquette (date limite de consommation ou date de durabilité minimale) sera testé en modifiant le pourcentage de consommations après la date apposée sur le fromage ou indiquée par le fromager.

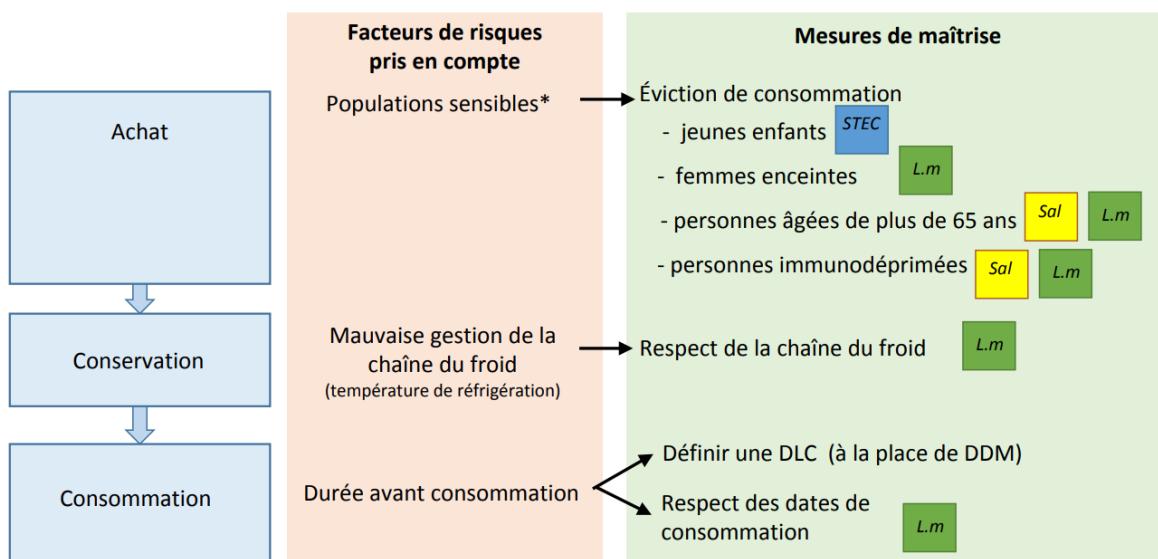


Figure 5 : Synthèse des facteurs de risque et des mesures de maîtrise au stade de la consommation. Les carrés spécifient les dangers visés par les mesures de maîtrise

*Sont considérés comme population sensible d'après (Anses, 2022) : les nourrissons et les jeunes enfants, les femmes enceintes, les personnes âgées, les personnes immunodéprimées ou atteintes de certaines maladies chroniques. (Légende : Sal : *Salmonella*, L.m : *L. monocytogenes*)

4 Modèles d'appréciation des risques

La modélisation conduite dans ce travail a tout d'abord visé à évaluer l'effet de l'ensemble des mesures de maîtrise décrites dans la section précédente sur le risque pour la santé publique. À cette fin, le modèle a été construit avec la volonté de relier quantitativement chaque mesure de maîtrise à un paramètre du modèle.

Par exemple, le niveau de contamination du lait de tank de la ferme par *L. monocytogenes* a été relié au niveau d'hygiène de l'installation de traite qui est elle-même reliée à l'hygiène de la ferme. Un des scénarios testés a été de supposer que toutes les fermes étaient équipées d'une installation de traite « satisfaisante » (c'est-à-dire ayant été conçue de façon à réduire efficacement la formation de biofilm sur les matériaux) tandis que le scénario de base estimait qu'actuellement un certain nombre de fermes n'étaient pas équipées d'une installation satisfaisante.

Cette modélisation est donc différente de celle souvent décrite dans la littérature qui vise à quantifier la propagation de la contamination microbienne de la « ferme à la fourchette » avec en variable d'entrée du modèle un niveau de contamination microbienne (prévalence et/ou concentration). La différence en termes de modélisation est illustrée avec l'exemple précité : ici la variable d'entrée du modèle a été le pourcentage de fermes équipées d'une installation satisfaisante alors que généralement les études traitant d'un sujet similaire auraient en variable d'entrée le niveau de *L. monocytogenes* dans le tank de lait. Toujours avec l'exemple précédent, le modèle développé ici ne relie pas la formation du biofilm au niveau de contamination du lait, mais les mesures de maîtrise (installation de traite et procédure de nettoyage) au niveau de contamination du lait.

La modélisation proposée par le GT permet également d'évaluer l'effet des mesures de surveillance décrites dans la section précédente. Pour ce faire, le modèle a été découpé « de la ferme à la fourchette » en petits modules faisant apparaître les objets mathématiques « animal », « troupeau », « tank de lait », etc. Il a donc été possible d'évaluer l'efficacité du retrait d'un animal, du lait issu d'une ferme, d'un lot de fromages issu d'un atelier, ou encore, d'un type de consommateur.

4.1 Identification et caractérisation des dangers

Cette étude vise à identifier et quantifier les risques liés à la présence des trois dangers retenus (*Salmonella*, STEC, *Listeria monocytogenes*) dans les différents fromages au lait cru, en se basant sur des modèles de dose-réponse spécifiques¹⁰ à chaque pathogène, et en prenant en compte la variabilité interindividuelle et les différentes catégories de virulence. Les sections suivantes précisent quelles hypothèses ont été retenues pour chaque danger.

4.1.1 STEC

Une infection à STEC peut entraîner chez l'Homme des symptômes variés allant d'une diarrhée simple à des complications sévères comme le syndrome hémolytique et urémique (SHU). Les premiers symptômes surviennent en moyenne 3 à 4 jours après ingestion d'un

¹⁰ La dose est la quantité ingérée, la réponse est la probabilité de déclencher la maladie sachant la dose. La dose réponse est indépendante de la sévérité de la maladie.

aliment contaminé et sont gastro-intestinaux : crampes abdominales et diarrhée initialement aqueuse puis sanglante. Les patients ne présentent que peu ou pas de fièvre. La maladie évolue vers un SHU dans 5 à 8 % des cas. Les symptômes du SHU surviennent en général dans les sept jours qui suivent le début de la diarrhée. Les signes évocateurs sont une grande fatigue, une pâleur et une diminution du volume des urines. Le SHU nécessite une prise en charge hospitalière avec, pour les formes les plus graves, une dialyse et/ou une transfusion sanguine. Une insuffisance rénale chronique est observée chez environ 30 % des cas de SHU, tandis que des complications neurologiques graves peuvent survenir dans 25 % des cas. En France, la létalité du SHU est estimée à environ 1 % chez les enfants de moins de 15 ans et à 20 % chez les adultes, selon les données françaises de surveillance.

La population la plus à risque de développer des symptômes ou des formes graves de la maladie (diarrhées sanglantes, SHU, complications neurologiques, décès) est la population des enfants de moins de 15 ans (surtout ceux âgés de moins de 5 ans). Entre 2017 et 2021, l'incidence a augmenté par rapport aux années précédentes, et est restée élevée et stable : elle était supérieure à 1,30 cas pour 100 000 enfants de moins de 15 ans, entre 2017 et 2020 (entre 154 et 168 cas notifiés par an) (Jones et al. 2023)¹¹.

Plusieurs relations dose-réponse sont disponibles (Strachan et al. 2005; P. Teunis, Ogden, and Strachan 2008; Delignette-Muller, Cornu, and Group 2008; Perrin et al. 2015). Elles ont toutes été établies à partir de données collectées pour le sérotype O157:H7. Ces relations se distinguent par la nature des effets prédictifs : probabilité d'infection pour deux des modèles (Strachan et al. 2005, Teunis, Ogden, et Strachan 2008), probabilité de SHU pour les deux autres (Delignette-Muller et Cornu 2008, Perrin et al. 2015). Le modèle de Perrin et al. (2015) a été retenu car il améliore la prise en compte de l'âge en l'intégrant dans le modèle comme variable continue dans le calcul de la probabilité de maladie.

L'hypothèse retenue est de considérer les différentes classes de virulence proposées en 2023 (Anses 2023). On retient que toutes les souches de la classe I de virulence (*stx2a+* et/ou *stx2d+* et *eae+*) ont la même virulence que celle de la souche STEC O157:H7 ayant entraîné une large épidémie en France en 2005, et sur laquelle est basée la relation dose-réponse. Pour les autres classes, on considère qu'elles sont 10 fois moins susceptibles de déclencher la maladie que les souches du groupe I. La proportion de chaque type de souche chez les animaux porteurs est déterminée à l'aide des données de confirmation du LNR des souches isolées dans le lait cru et les fromages au lait cru.

Le modèle distingue parmi les souches de la classe de virulence I celles appartenant au sérotype O26:H11 et possédant les gènes *stx2a* et/ou *stx2d*, pour établir les mesures de surveillance. Le modèle considère également la proportion de souches présentant une acidorésistance particulière (appartenant au sérotype O26:H11 quelle que soit la classe de virulence).

L'application de ces relations dose-réponse dans le modèle permet d'estimer le nombre de cas humains d'infections liés au STEC. Le nombre de cas hospitalisés et le nombre de décès ont également été calculés à partir des proportions rapportées dans l'étude de van Cauteren et al. (2018). Le nombre de cas graves (hospitalisés) a été estimé comme correspondant à 2,1 % du nombre total de cas. Le nombre de décès a ensuite été calculé en appliquant un taux de létalité de 1,1 % aux hospitalisations estimées.

¹¹ Il y a également des cas associés aux personnes âgées et/ou immunodéprimées, mais ils ne sont pas, à ce jour, formellement associés aux fromages au lait cru.

Relation dose-réponse utilisée pour les STEC

La probabilité d'infection dépend de l'âge et de la dose ingérée avec la portion de fromage. Elle a été estimée à l'aide de l'équation suivante :

$$P(\text{infection}|\text{age}) = 1 - (1 - p_{\text{age}})^{\text{dose}}$$

où dose est la dose ingérée évaluée à partir du modèle d'exposition pour chaque classe d'âge des consommateurs et p_{age} la probabilité d'infection associée à 1 cellule de STEC. p_{age} dépend en effet de l'âge du consommateur :

$$p_{\text{age}} = p_0 \times \exp(-k \times \text{âge})$$

Les deux paramètres du modèle dose-réponse p_0 et k , ont respectivement été estimés à partir du nombre de cas observés pendant une seule épidémie et des données de surveillance épidémiologique. Les valeurs retenues sont pour k de -0,38 avec un intervalle de crédibilité à 95 % [-0,40, -0,36] et pour $\log_{10}(p_0)$ de -2,33 avec un intervalle de crédibilité à 95 % [-2,56, -2,12].

4.1.2 *Salmonella*

Salmonella enterica subsp. *enterica* (non typhique) provoque une gastro-entérite auto-limitante, de légère à modérée. La salmonellose se caractérise généralement par l'apparition d'une fièvre aiguë, de douleurs abdominales, d'une diarrhée, de nausées et parfois de vomissements. L'apparition des symptômes de la maladie se produit 6 à 72 heures après l'ingestion de l'aliment contaminé, et la maladie dure de 2 à 7 jours. Les patients se rétablissent sans traitement spécifique dans la plupart des cas. Dans un nombre de cas limité, les personnes atteintes de salmonellose peuvent décéder de complications (Marchello et al. 2022). La proportion de décès est estimée à 3,5 décès pour 10 000 cas de salmonelloses (Dieter Van Cauteren et al. 2017).

La salmonellose est la deuxième zoonose alimentaire d'origine bactérienne la plus fréquemment signalée dans de nombreux pays européens. En France, le dispositif de surveillance des infections à *Salmonella* est basé, d'une part sur la déclaration obligatoire des TIAC et d'autre part sur les données du CNR. Les cas recensés par ce système de surveillance ne reflètent cependant pas l'incidence réelle de la maladie. En prenant en compte les différents facteurs de sous-estimation de l'incidence des salmonelloses, le taux d'incidence annuel en population générale a été ainsi estimé à 307 cas pour 100 000 habitants, soit un nombre de cas de 192 450 (Dieter Van Cauteren et al. 2017). L'attribution des cas de salmonelloses aux fromages au lait cru est incertaine mais les fromages à pâte molle à croûte fleurie et à pâte pressée non cuite à affinage court sont régulièrement impliqués dans des cas groupés de salmonellose (Anses 2022).

Plusieurs relations dose-réponse sont disponibles pour *Salmonella* (P.F. Teunis et al. 2010; WHO 2002; P.F. Teunis 2022; Strickland, Sampedro, and Hedberg 2023).

La relation proposée par la FSIS a été retenue (FSIS 2024). Elle s'appuie sur le modèle de bêta-poisson et propose un paramétrage en fonction des sérovars regroupés en deux catégories de virulence (« les moins virulents », « les plus virulents »). Une approximation de la relation dose-réponse a été établie à l'aide d'un modèle polynomial (cf. encadré ci-dessous). Les principaux sérovars appartenant au groupe des « plus virulents » sont Dublin, Typhimurium ou Enteritidis. Dans le groupe des moins virulents, on retrouve par exemple les sérovars Montevideo et Infantis (FSIS, 2024)

La proportion de souches de *Salmonella* appartenant à la classe « plus virulente » parmi les animaux porteurs (bovins laitiers) est estimée à 33 % au niveau national (Bonifait et al. 2021). Parmi les sérovars de cette classe de virulence, il est estimé que *S. Dublin* représente 78 % des souches (ANSES, 2018). Pour compléter ces estimations, les données issues du réseau *Salmonella* sur la période 2018-2024 ont été mobilisées afin de documenter la distribution des sérovars et d'établir, pour chaque type de fromage considéré, la proportion de souches appartenant à la classe des sérovars les plus virulents.

Dans le modèle, l'hypothèse retenue est que ni le comportement dans le lait et les fromages, ni la sensibilité des méthodes de détection ne dépendent des sérotypes et donc des classes de virulence de *Salmonella*.

L'application de ces relations dose-réponse dans le modèle permet d'estimer le nombre de cas humains de salmonellose. Cette estimation du nombre de cas hospitalisés et du nombre de décès a également été calculée à partir des proportions rapportées dans l'étude de van Cauteren et al. (2018). Le nombre de cas hospitalisés a été estimé comme correspondant à 2,1 % du nombre total de cas. Le nombre de décès a ensuite été calculé en appliquant un taux de létalité de 1,7 % aux hospitalisations estimées.

Relation dose-réponse utilisée pour *Salmonella*

Le modèle polynomial est utilisé pour approximer les courbes de dose-réponse des différentes catégories de virulence de *Salmonella*. La probabilité de salmonellose pour les sérovars les plus virulents (catégorie c1) est donnée d'après FSIS 2024 par :

$P_{\text{salmonellose}}^{\text{c1}} = \beta_0 + (\beta_1 \cdot \log(\text{dose} + 1)) + \beta_2 \cdot (\log(\text{dose} + 1))^2 + \dots + \beta_9 \cdot (\log(\text{dose} + 1))^9$ Le même modèle polynomial est utilisé pour les sérovars les moins virulents (catégorie c2). Les séries de paramètres (β_0, \dots) des deux modèles sont données en annexe 4.

4.1.3 *L. monocytogenes*

L. monocytogenes représente un agent pathogène significatif dans le domaine de la sécurité sanitaire des aliments, du fait de sa capacité à causer des infections graves (listériose), en particulier chez les populations vulnérables. Les personnes chez qui le diagnostic de listériose est confirmé présentent une forme invasive de la maladie, c'est-à-dire une diffusion de la bactérie au-delà du tube digestif. L'infection peut prendre différentes formes comme une affection neurologique, une bactériémie ou une atteinte materno-foetale chez la femme enceinte. La maladie fait l'objet d'une déclaration obligatoire. Les données les plus récentes de surveillance des cas de listériose montrent que 451 cas ont été recensés (EFSA and ECDC 2023) pour une incidence de 0,66 cas pour 100 000 habitants. Compte tenu de la gravité de la maladie et de l'efficacité de la surveillance, les cas de listériose invasives recensés tendent à l'exhaustivité (Leclercq et al. 2019). Les populations à haut risque sont les personnes âgées de plus de 65 ans, les personnes immunodéprimées (notamment celles atteintes de certaines maladies chroniques) et les femmes enceintes (R. Pouillot et al. 2015). Le taux de mortalité des listérioses invasives est compris entre 20 % et 30 % (EFSA and ECDC 2021; Tourdjman, Laurent, and Leclercq 2014).

Le modèle de dose-réponse utilisé dans cette évaluation quantitative des risques prend en compte la variabilité interindividuelle de la réponse à l'exposition, qui peut être influencée par plusieurs facteurs tels que l'âge, le sexe du consommateur, et la virulence des souches de *L. monocytogenes* (R. Pouillot et al. 2024).

Le modèle publié considère trois catégories de virulence : les souches « les moins virulentes », « virulentes » et « les plus virulentes ». Les relations dose-réponses ont été établies selon

la distribution des complexes clonaux parmi les cas cliniques de listériose humaine et dans les aliments (Maury et al. 2016; E.M. Nielsen et al. 2017). Le GT FALC2 retient ce modèle pour estimer le nombre de cas de listériose et un taux de létalité de 25 % pour exprimer le nombre de décès parmi les cas. La prise en compte des catégories de virulence permet une meilleure estimation du risque mais ne concerne pas les mesures de maîtrise.

En l'absence de données spécifiques sur la diversité des souches dans le lait, les ateliers de fabrication et les fromages, la répartition entre les trois classes de virulence est considérée comme identique en fonction du stade de production. En revanche la littérature montre que ni le comportement dans le lait et les fromages, ni la sensibilité des méthodes de détection ne dépendent des complexes clonaux et donc des classes de virulence (Rodriguez de Souza et al. 2023). Par ailleurs on considère que la classe de virulence ne joue que sur la probabilité de listériose mais pas sur sa sévérité (c'est-à-dire la létalité) (Pouillot et al 2024).

Tous les cas de listérioses prédits par le modèle sont associés à des cas graves. Le taux de létalité utilisé dans cette évaluation est estimé à 20%.

Relation dose-réponse utilisée pour *L. monocytogenes*

Le modèle dose réponse utilisé pour estimer la probabilité de listériose est le modèle poisson lognormal

$$P(\text{listeriose}|n, \theta) = 1 - \int_0^1 \exp(-r \times \text{dose}) f(r, \theta) dr$$

Où avec $f(r, \theta=(\mu, \sigma))$ est la densité de la distribution lognormale avec les paramètres μ (moyenne) et σ (écart-type). Les valeurs des paramètres μ et σ sont adaptées au n populations à savoir les deux sexes, les sept classes d'âge et les trois catégories de virulence sont issues de la publication de Pouillot et al. (2024)). Les données d'une enquête européenne ont permis de montrer que les souches « les moins virulentes », « virulentes » et « les plus virulentes » représentaient respectivement 12,4 %, 47,2 % et 32,6 % (Møller Nielsen et al. 2017) des cas. Les souches associées à des complexes clonaux pour lesquels la classification de virulence n'est pas disponible (soit 7,8 %) ont été considérées par le GT comme appartenant à la classe « virulente ».

4.2 Construction du modèle pour l'intégration des mesures de maîtrise et de surveillance

Afin de mieux répondre aux différents contextes de transformation, deux situations ont été considérées. La première concerne les fromages fabriqués par des producteurs de fromages en conditions industrielles, collectant le lait de plusieurs fermes. La section 4.2.1 décrit le modèle retenu pour cette situation. La seconde situation envisage la transformation fromagère à la ferme (fromages fermiers). La section 4.2.2 ci-après pointe les spécificités du modèle retenu pour cette seconde situation au regard de la première. Dans les deux cas, comme il a été énoncé en section 4.1, le modèle vise à relier les mesures de maîtrise aux paramètres du modèle. Dans cette logique, en s'appuyant sur la littérature, un des éléments clés de la construction du modèle a été le paramètre « facteur de risque », c'est à dire le *ratio* de risque entre une situation satisfaisante et une situation non satisfaisante car la littérature ne donne pas de chiffre absolu mais des valeurs relatives. Par exemple, vis-à-vis du risque de portage de STEC d'un animal via l'alimentation dans une ferme donnée, la littérature ne fournit pas un estimateur du niveau de portage mais le *ratio* de portage ($F_{\text{alim_STEC}}$) entre les fermes où la qualité de l'alimentation est non satisfaisante ($p_{\text{STEC}}^{\text{alim non sat}}$) et les fermes où la qualité de l'alimentation est satisfaisante ($p_{\text{STEC}}^{\text{alim sat}}$), c'est-à-dire le rapport entre ces deux probabilités.

Par ailleurs, bien que le modèle ait été initialement conçu pour les fromages au lait de vache, il a également été adapté aux productions caprines et ovines. Les principes conceptuels restent identiques, mais certaines valeurs de paramètres et hypothèses épidémiologiques diffèrent, comme précisé en section 4.2.3.

4.2.1 Cas de la transformation par les entreprises

Le schéma de la Figure 6 reprend le modèle de Monte Carlo développé dans cette étude pour les fromages au lait de vache (le schéma est similaire pour les autres espèces, seuls les effectifs des fermes et animaux sont adaptées). Les mesures de maîtrise sont détaillées dans les schémas spécifiques aux étapes ferme (Figures 1, 2 et 3), atelier de transformation (Figure 4) et consommateurs (Figure 5).

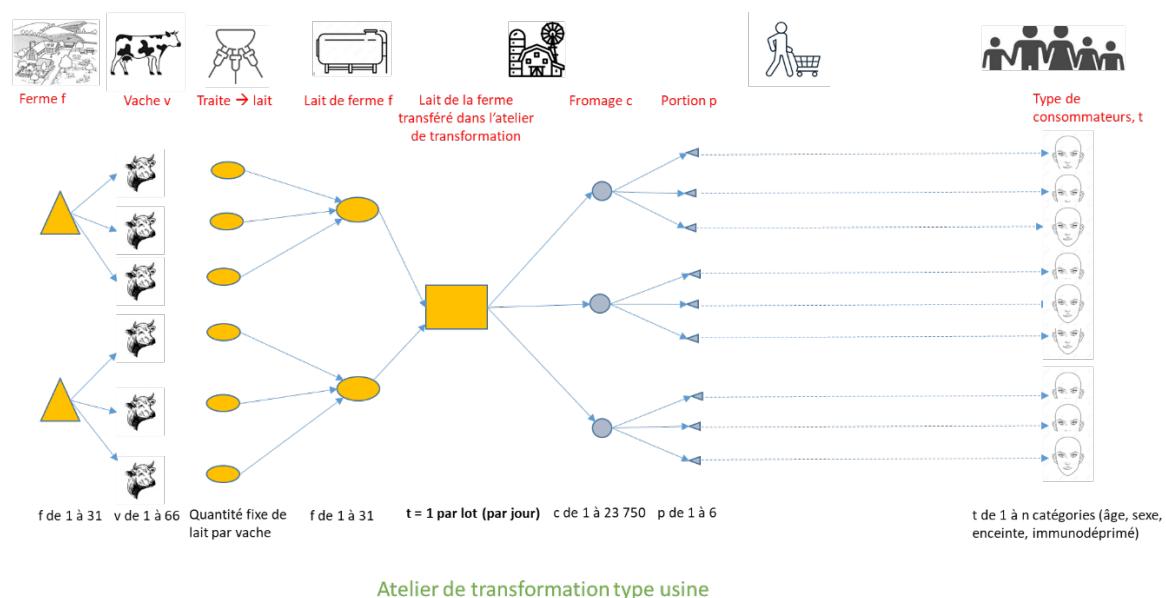


Figure 6 Schéma d'ensemble du modèle développé pour les fromages de lait de vache. Les mesures de maîtrise peuvent conduire à éliminer une ferme, une vache, le lait issu d'une ferme, un lot issu d'un atelier, un type de consommateurs.

4.2.1.1 Module ferme

4.2.1.1.1 Caractéristiques des fermes

Le point de départ des modèles d'appréciation des risques développés par le groupe de travail est la ferme. Le modèle considère que le lait d'un certain nombre de fermes (nombre établi en cohérence avec les données des différentes filières de production des fromages au lait cru) est mélangé lors de la collecte et mis en fabrication par une ou plusieurs entreprises. Le lait de collecte mis en œuvre un jour donné est considéré comme un lot de fabrication.

Compte tenu du fait que la taille des troupeaux en France n'est pas considérée comme un facteur de risque pour le portage des agents pathogènes (car cette taille est inférieure à celle décrite comme un facteur de risque dans la littérature, cf Annexe 4), le GT a fait le choix de travailler sur des fermes ayant toutes les mêmes caractéristiques en termes de nombre d'animaux et de litres de lait produits annuellement. La valeur du nombre d'animaux est fixée à la moyenne nationale des élevages laitiers dans les bassins de production fromagers, soit 66 vaches laitières. La production pour une lactation de référence de 305 jours est de 7 770

litres (soit 25,5 litres / jour). Le taux de renouvellement annuel des animaux dans le troupeau est également considéré afin d'évaluer le risque d'introduction d'animaux porteurs des pathogènes considérés dans les troupeaux et la performance du dépistage. En élevage bovin laitier, ce taux est estimé à 35 % (Lengagne 2019). Pour les chèvres, la quantité de lait produite est de 3,1 litres par jour sur 305 jours de lactation. Pour les brebis, la quantité de lait produite est de 1,5 litre par jour sur 280 jours de lactation.

La concentration en *E. coli* des laits de tank des fermes est régulièrement suivie en France. Les mesures de suivi de ces concentrations sont un indicateur de la quantité moyenne de matières fécales ayant été transférées dans le lait lors de la traite (on retient l'hypothèse que la concentration en *E. coli* dans les matières fécales des troupeaux est connue et peu variable) (Perrin et al. 2015). Les données disponibles de suivi de ces concentrations dans le lait permettent d'identifier trois types de fermes (Annexe 4). Le GT pour la modélisation a défini deux conditions : les fermes présentant un niveau moyen élevé de *E. coli* dans leur lait de tank (consécutif à un transfert important de matières fécales vers le lait), et les fermes avec un niveau moyen de *E. coli* qualifié de « satisfaisant ».

Le GT considère que les fermes présentant des niveaux d'*E. coli* insatisfaisants sont les fermes dans lesquelles la maîtrise de l'hygiène des locaux et de la traite doit être améliorée. Le GT considère également que si ces fermes améliorent et appliquent les mesures de maîtrise relatives à l'hygiène (audit de la salle de traite, amélioration du paillage, etc.) alors elles présenteront dans leur lait des niveaux de contamination en *E. coli* (et donc une quantité de matières fécales) identiques à ceux des fermes qualifiées de satisfaisantes.

La synthèse des valeurs utilisées pour la modélisation des caractéristiques des élevages est présentée dans l'annexe 4.1.

4.2.1.1.2 STEC

Les ruminants sont des porteurs asymptomatiques de STEC. Ils le deviennent à la suite de l'ingestion de ces bactéries *via* l'eau d'abreuvement, l'alimentation, ou *via* des contacts directs avec leur environnement (locaux, litières, pâtures, etc.) ou avec d'autres animaux (notamment les nouveaux animaux introduits dans le troupeau) (Dawson et al. 2018).

Des facteurs spécifiques à l'animal (par exemple, la race, la génétique, l'âge) peuvent influencer le portage et l'excrétion des STEC (FAO and WHO 2022). Dans certaines situations, les niveaux d'excrétion des STEC sont inférieurs à la limite de détection des techniques utilisées suggérant que le pourcentage de bovins porteurs de STEC est sous-estimé. Cette hypothèse a été confirmée lors des investigations microbiologiques réalisées dans les fermes potentiellement impliquées dans l'épidémie de cas de SHU survenue en 2019 en lien avec la consommation de reblochon. La souche de STEC a pu être détectée sur le filtre à lait des tanks mais les analyses individuelles réalisées sur les bovins n'ont pas permis d'identifier le(s) bovin(s) à l'origine de cette contamination (Anses 2020).

- Prévalence
 - Mesures de maîtrise et prévalence

Dans la construction du modèle mathématique, le GT a considéré qu'il existait deux catégories de ruminants, les porteurs de STEC et les non-porteurs, et c'est sur cette prévalence que les mesures de maîtrise identifiées plus haut vont porter.

La prévalence chez les animaux des STEC les plus fréquemment impliqués dans les cas graves est considérée comme relativement faible. Cette prévalence ($p_{STECobs}$) a été estimée à 1,8 % ($n = 337$) pour les vaches laitières en France mais avec un seuil de détection de 1 bactérie dans 10 g (Bibbal et al. 2015). Sachant que la part des animaux porteurs présentant

des niveaux de contamination inférieurs à la limite de détection est estimée à 22,9 % (Clough, Clancy, and French 2009; Robinson 2004), la prévalence des vaches laitières porteuses de STEC les plus fréquemment impliqués dans les cas graves peut être estimée à 2,2 % (p_{STEC}).

Dans le scénario de base, la prévalence des STEC au sein des animaux porteurs sera mathématiquement liée (i) à l'alimentation des animaux (qualité sanitaire des aliments) et (ii) aux conditions d'hébergement des animaux (hygiène des locaux). Concernant l'alimentation, il y a deux types d'élevage : ceux qui appliquent déjà les mesures de maîtrise de façon satisfaisante (en matière d'enrubannage et d'ensilage), et les autres. L'amélioration de la qualité des ensilages et enrubannages n'est susceptible de réduire la prévalence de portage que pour les élevages n'appliquant pas encore de façon satisfaisante ces mesures.

Le même raisonnement a été appliqué pour les mesures de maîtrise concernant l'hygiène des locaux (aire d'attente devant la salle de traite, raclage des aires bétonnées, paillage, propreté des couchettes). L'amélioration ne concerne que les élevages n'appliquant pas encore de façon satisfaisante ces mesures (cf. Annexe 4 description des fermes). L'encadré ci-dessous permet de montrer comment ont été estimées les valeurs de portage de STEC avant et après mise en place de la mesure de maîtrise.

Portage des STEC par les animaux

Les deux voies de contamination d'un animal par une souche de STEC (hors O26:H11, cf prochain encadré) sont l'alimentation et l'hygiène des locaux, les deux pouvant concourir à cette contamination, en même temps. Pour ne pas être contaminé ($1-p_{STEC}$), l'animal ne doit donc pas être exposé ni par l'alimentation (a), ni par un défaut d'hygiène (h).

Ce qui se traduit mathématiquement par :

$$p_{STEC} = 1 - (1 - p_{STEC}^a) \times (1 - p_{STEC}^h)$$

Où p_{STEC} est la probabilité qu'un animal soit contaminé, c'est-à-dire porteur.

La voie de contamination liée à l'alimentation, p_{STEC}^a , se déduit de la théorie des probabilités, sachant que certaines fermes ont une alimentation satisfaisante ($Pr(alim_{sat})$) et d'autres non ($Pr(alim_{nonsat})$).

$$p_{STEC}^a = p_{STEC}^{alimnonsat} \times Pr(alim_{nonsat}) + p_{STEC}^{alimsat} \times Pr(alim_{sat})$$

Où :

$p_{STEC}^{alimnonsat}$ est la probabilité de portage via l'alimentation dans une ferme où la qualité de l'alimentation est non satisfaisante et $p_{STEC}^{alimsat}$ est la probabilité de portage via l'alimentation dans celle où la qualité de l'alimentation est satisfaisante.

$p_{STEC}^{alimnonsat} = F_{alim_STEC} \times p_{STEC}^{alimsat}$ avec F_{alim_STEC} , le ratio de risque entre les deux types de fermes.

De même, la voie de contamination liée à l'hygiène, p_{STEC}^h , se déduit de la théorie des probabilités, sachant que certaines fermes ont une hygiène satisfaisante (hyg_{sat}) et d'autres non (hyg_{nonsat}). On a

$$p_{STEC}^h = p_{STEC}^{hygnonsat} \times Pr(hyg_{nonsat}) + p_{STEC}^{hygsat} \times Pr(hyg_{sat})$$

avec $p_{STEC}^{hygnonsat} = F_{hyg_STEC} \times p_{STEC}^{hygsat}$

- Surveillance des animaux entrants et prévalence

Concernant les animaux porteurs de STEC appartenant au sérotype O26:H11 et possédant les gènes *stx2a* et/ou *stx2d*, nous avons également considéré une troisième voie de contamination des animaux : l'introduction d'animaux porteurs de STEC O26:H11 *stx2a+* ou *stx2d+* (cf section 3.1.2). La probabilité de portage des STEC O26 :H11 (*stx2a+* ou *stx2d+*) faisant suite à l'entrée de nouveaux animaux va dépendre du statut de l'élevage d'origine de ces derniers. C'est la réalisation d'une surveillance des élevages producteurs de lait à partir des filtres à lait des tanks qui permettra de déterminer le statut de ces élevages d'origine (indemnes/non indemnes) pour ce type de souche. L'encadré ci-dessous précise les valeurs de portage de STEC O26:H11 *stx2a+* et/ou *stx2d+* avant et après mise en place de la mesure de surveillance.

Portage des STEC O26:H11 *stx2a+* et/ou *stx2d+* par les animaux

Les trois voies de contamination d'un animal par un STEC O26:H11 *stx2a+* et/ou *stx2d+* sont l'introduction dans l'élevage d'un animal porteur, l'alimentation et l'hygiène des locaux, les trois pouvant concourir à cette contamination, en même temps. Pour ne pas être contaminé (1- p_{O26}), l'animal ne doit donc être ni porteur initialement (i), ni exposé par l'alimentation (a) ou par un défaut d'hygiène (h).

Nous faisons l'hypothèse que les probabilités de contamination via l'alimentation ou le manque d'hygiène sont les mêmes que dans le cas des STEC :

$$p_{O26} = 1 - (1 - p_{O26}^i) \times (1 - p_{STEC}^a) \times (1 - p_{STEC}^h)$$

Où p_{O26} est la probabilité qu'un animal soit contaminé, c'est-à-dire porteur d'un STEC O26:H11 *stx2a+* et/ou *stx2d+*.

p_{O26}^i dépend du statut de la ferme d'origine des nouveaux animaux (indemne: S = I-O26 , ou non-indemne : S = NI-O26), et du statut de l'animal importé (pour les fermes non indemnes) :

$$p_{O26}^i = p_{O26}^{nonind} \times \Pr(S_{NI-O26}^{Ferme}) + p_{O26}^{ind} \times \Pr(S_{I-O26}^{Ferme})$$

Où p_{O26}^{nonind} est la probabilité de portage dans une ferme non indemne et p_{O26}^{ind} celle dans une ferme indemne. Considérant cette dernière comme nulle, on obtient :

$$p_{O26}^i = p_{O26}^{nonind} \times \Pr(S_{NI}^{Ferme})$$

Le pourcentage d'animaux porteurs pour les STEC O26:H11 *stx2a+* et/ou *stx2d+* a été déterminé à partir de la prévalence globale pour les STEC et de la proportion d'isolats O26:H11 *stx2a+* et/ou *stx2d+* parmi les STEC au niveau des laits crus (données LNR).

- Niveaux de contamination

Les mesures de maîtrise ne portent pas sur le niveau d'excrétion des STEC dans les fèces, mais ces niveaux sont une donnée d'entrée du modèle importante à estimer. Pour ce faire, les hypothèses suivantes ont été faites. Chez les animaux porteurs, les niveaux d'excrétion de STEC dans les fèces sont très variables (Auvray et al. 2023; Bibbal et al. 2022). Ces niveaux peuvent aller de 1 ufc/10g jusqu'à 10⁹ ufc/g de matières fécales (> 10⁴ ufc/g pour les animaux

qualifiés de super-excréteurs) (Stephens, McAllister, and Stanford 2009). La durée d'excrétion des STEC est très variable selon l'animal : de quelques jours à plusieurs mois, voire jusqu'à deux ans (Geue et al. 2002; Lim et al. 2007). Un animal porteur peut excréter des STEC à différents niveaux en fonction des périodes de l'année (Rice et al. 2003). Le statut de super-excréteur est également variable dans le temps, la super-excrétion des STEC ayant été rapportée comme intermittente (Williams et al. 2015). Les causes de cette variabilité (alimentation, saisonnalité,...) sont difficiles à identifier et n'ont pas été introduites dans le modèle (FAO and WHO 2022). Si la super-excrétion de STEC a d'abord été mise en évidence pour le seul sérotype O157:H7, des études montrent qu'elle concerne aussi les autres sérotypes (Auvray et al. 2023; V.S. Castro et al. 2022; Dixon et al. 2020; Murphy et al. 2016) et plus généralement les bactéries entéropathogènes (Kempf et al. 2022).

En prenant en compte la répartition des niveaux de STEC dans les fèces, déterminée par Stephens et al. (2009), et la fraction des animaux pour lesquels les niveaux de contamination des fèces sont inférieurs à la limite de détection, une distribution bimodale (combinaison de deux lois normales) a pu être ajustée (Figure 7). Cette loi est utilisée pour caractériser les niveaux de STEC et STEC O26:H11 *stx2a+* et/ou *stx2d+*.

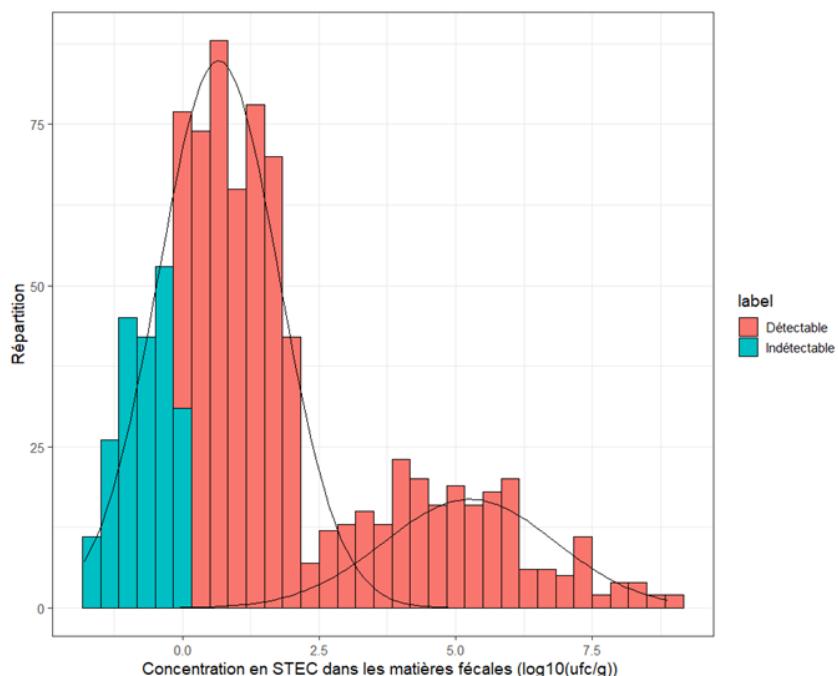


Figure 7 Répartition des niveaux de STEC dans les matières fécales. Les données en rouge sont issues de Stephens et al. (2009). Les données en bleu correspondent à la fraction indéetectable. Les courbes représentent l'ajustement de la loi bi-normale et représentent la loi de distribution utilisée pour le modèle STEC et STEC O26 :H11 *stx2a+* et/ou *stx2d+*.

4.2.1.1.3 *Salmonella*

Les bovins et autres ruminants sont des réservoirs de *Salmonella* (Rukambile et al. 2019). *Salmonella* présente la capacité d'établir une infection à long terme, caractérisée par un statut de porteur asymptomatique, avec des périodes intermittentes de bactériémie et d'excrétion intermittente dans les fèces et le lait (Foster et al. 2021; Holschbach and Peek 2018). Une partie des animaux porteurs peut déclencher une salmonellose clinique. Chez les bovins, le symptôme des salmonelloses cliniques le plus typique est une diarrhée parfois hémorragique accompagnée de fièvre. La maladie touche des animaux isolés mais peut parfois prendre une

forme épidémique. Des avortements peuvent également survenir, indépendamment ou non des cas de diarrhée (Hecker et al. 2023).

- Prévalence
 - Mesures de maîtrise et prévalence

Dans la construction du modèle mathématique, le GT a considéré qu'il existait trois catégories de ruminants, les animaux porteurs de *Salmonella* malades (symptomatiques), les porteurs de *Salmonella* non malades (asymptomatiques) et les non-porteurs. La prévalence de portage a été établie à partir des données collectées en France sur des matières fécales d'animaux à l'abattoir (Bonifait et al. 2021). La prévalence de portage asymptomatique est de 3 % (données observées sur 969 animaux prélevés pendant une période de 6 mois).

Le modèle considère également qu'une fraction des animaux porteurs peut déclencher une salmonellose clinique ; cette fraction est estimée à 2 % (Cummings et al. 2010). Dans le modèle, on considérera ainsi que chaque bovin porteur a 2 % de chance de déclencher une salmonellose clinique. Le nombre d'animaux atteints de salmonellose clinique ne joue pas directement sur le niveau de contamination des laits de tank. En effet, le GT considère que les animaux cliniquement atteints sont systématiquement détectés par l'éleveur et que le lait des animaux concernés est écarté. Dans les mesures de maîtrise, on considérera une surveillance renforcée de *Salmonella* au niveau des animaux (sérologie individuelle des vaches laitières et des jeunes animaux) et des lots de fromage dès l'apparition d'une salmonellose clinique dans le troupeau.

C'est sur la prévalence de portage asymptomatique que les mesures de maîtrise identifiées dans la section 3 vont porter. Dans le scénario de base, la prévalence des animaux porteurs sera mathématiquement liée aux conditions d'hébergement des animaux (hygiène des locaux).

Concernant l'hygiène, il y a deux types d'élevage : ceux qui appliquent déjà les mesures d'hygiène générale de façon satisfaisante et les autres. L'amélioration de l'hygiène générale n'est susceptible de réduire la prévalence de portage que pour les élevages n'appliquant pas encore de façon satisfaisante ces mesures.

Portage de *Salmonella* par les animaux

La voie de contamination d'un animal est l'hygiène des locaux (p_{Salmo}^h) ; une fois contaminé, l'animal peut ne pas déclencher une salmonellose clinique et donc ne pas être détecté ($1 - p_{Salmo}^s$).

Pour être porteur (p_{Salmo}), l'animal doit donc être exposé par l'hygiène (h) et ne pas avoir été détecté. Ce qui se traduit mathématiquement par :

$$p_{Salmo} = p_{Salmo}^h \times (1 - p_{Salmo}^s)$$

La voie de contamination liée à l'hygiène, p_{Salmo}^h , se déduit de la théorie des probabilités, sachant qu'une certaine proportion (Pr) de fermes a une hygiène satisfaisante (hyg_{sat}) et d'autres non (hyg_{nonsat}).

$$p_{Salmo}^h = p_{Salmo}^{hygnonsat} \times Pr(hyg_{nonsat}) + p_{Salmo}^{hygsat} \times Pr(hyg_{sat})$$

avec $p_{Salmo}^{hygnonsat}$ la probabilité de contamination par *Salmonella* dans les fermes avec une hygiène non satisfaisante et p_{Salmo}^{hygsat} la probabilité dans celles avec une hygiène satisfaisante ;

$$\text{avec } p_{Salmo}^{hygnonsat} = F_{hyg_Salmo} \times p_{Salmo}^{hygsat}.$$

Le ratio F_{hyg_Salmo} est connu (H. Davison et al. 2006b) et la proportion de fermes ayant une hygiène satisfaisante, $Pr(hyg_{sat})$, est la même que celle considérée dans le cas de la contamination par STEC.

$1 - p_{Salmo}^S$ correspond à la probabilité qu'un animal positif à *Salmonella* ne déclenche pas une salmonellose clinique ($Pr(SA_{sub-clinique}^{Animal})$), c'est-à-dire qu'il soit asymptomatique, et ne soit donc pas détecté par l'éleveur puis écarté du troupeau et de la traite.

- Surveillance des troupeaux pour *Salmonella* Dublin

Concernant la mesure de maîtrise relative à la surveillance, le modèle propose de classifier les troupeaux indemnes/non indemnes sur la base d'une sérologie des laits de tank réalisée trois fois par an. Par rapport au scénario de base (= aucune restriction de mouvements d'animaux), un scénario alternatif est proposé dans lequel un élevage indemne ne peut introduire de nouveaux animaux que depuis d'autres élevages indemnes.

Pour les élevages non indemnes, le modèle évaluera l'efficacité d'une surveillance renforcée reposant sur la réalisation d'un test sérologique individuel quatre fois par an à partir des laits des vaches laitières, et un test sérologique deux fois par an sur des jeunes animaux (veaux femelles et génisses). Le modèle testera l'efficacité du retrait de la production laitière des animaux porteurs.

L'encadré ci-dessous précise comment les valeurs de portage de *S. Dublin* avant et après mise en place de la mesure de maîtrise sont établies.

Portage de *Salmonella* Dublin par les animaux et statut des troupeaux

Dans le cas de *S. Dublin*, il y a deux voies de contamination : introduction de nouveaux animaux et hygiène des locaux, les deux pouvant concourir à cette contamination, en même temps. Ce qui se traduit mathématiquement par :

$$p_{S.Dublin} = 1 - (1 - p_{S.Dublin}^i) \times (1 - p_{SALMO}^h)$$

$p_{S.Dublin}^i$ dépend tout d'abord du statut de la ferme d'origine des nouveaux animaux (non indemne : $S_{NI-Dublin}^{ferme}$) et du statut de l'animal importé depuis une ferme non indemne.

$p_{S.Dublin}^i$ dépend ensuite du caractère sub-clinique (asymptomatique) de la maladie (non détecté par l'éleveur)

$$p_{S.Dublin}^i = p_{S.Dublin}^{nonind} \times Pr(S_{NI-Dublin}^{ferme}) \times Pr(S.Dublin_{sub-clinique}^{Animal})$$

Où $p_{S.Dublin}^{nonind}$ est probabilité de portage de *S. Dublin* dans une ferme non indemne et $Pr(S.Dublin_{sub-clinique}^{Animal})$ la probabilité qu'un animal porteur de *S. Dublin* ne déclenche pas une salmonellose clinique (Cummings et al., 2010).

- Niveaux de contamination

Comme expliqué précédemment, les mesures de maîtrise ne portent pas sur le niveau d'excrétion, mais ces niveaux sont une donnée d'entrée du modèle importante à estimer. Plusieurs études caractérisant la variabilité de la contamination des matières fécales sont disponibles (Bonifait et al. 2021; Fegan et al. 2004; Ohta et al. 2019). Le GT a retenu particulièrement l'étude réalisée en France en 2021. La Figure 8 montre la distribution des niveaux de contamination. Ces niveaux peuvent aller de 1 ufc/100 g jusqu'à 10^6 ufc/g de matières fécales.

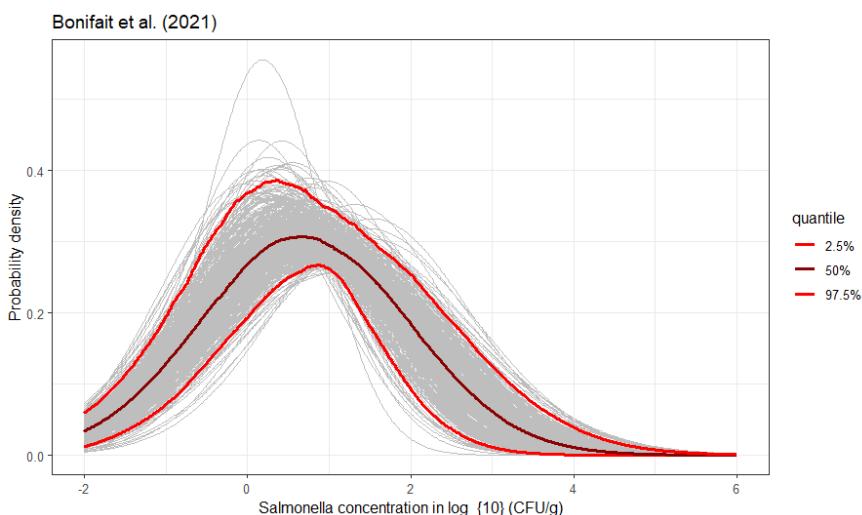


Figure 8 Répartition de *Salmonella* dans les matières fécales des bovins. Les courbes représentent la variabilité et l'incertitude de loi normale ajustées sur le \log_{10} des concentrations observées en CFU/g (données issues de (Bonifait et al. 2021)).

4.2.1.1.4 *L. monocytogenes*

À la différence de *Salmonella* et STEC pour lesquelles la variable d'entrée du modèle était le portage de l'animal, avec *L. monocytogenes*, en raison de son caractère ubiquitaire, la variable d'entrée est le lait de tank. Trois facteurs de risque ont été identifiés (Anses 2022; Schoder, Pelz, and Paulsen 2023), à savoir : la contamination par des mammites subcliniques, la contamination par un défaut d'hygiène de l'environnement et la contamination par un défaut d'hygiène de la traite.

L'infection des mamelles par *L. monocytogenes*, bien qu'elle ne se traduise pas toujours par des symptômes visibles, est une source significative de contamination du lait (Addis et al. 2019; Bemrah et al. 1998; Papić et al. 2019). Cette source est responsable de 10 % de la contamination observée dans les laits de tank d'après Bemrah et al. (1998). La prévalence de *L. monocytogenes* observée dans les laits de tank des fermes était de 1,2 % en France sur la période 2021-2022. Dans la construction du modèle, le GT a considéré que la part de la contamination issue des mammites est identique quelle que soit la ferme (taille fixe du troupeau) et est donc de 0,12 %. La recherche des cellules somatiques est un moyen indirect de détecter ces mammites.

Concernant la contamination par l'environnement, bien que *L. monocytogenes* puisse contaminer le lait par une multitude de sources (matières fécales, poussières, terres, alimentation et litières), la mauvaise qualité de l'ensilage et de l'enrubannage est considérée comme une source majeure de contamination. Cette contamination de l'ensilage et de l'enrubannage est associée à une augmentation de l'excrétion fécale de *L. monocytogenes* et contribue ainsi au maintien et à la dispersion de cette bactérie dans l'environnement et à la contamination du lait cru (H. Castro et al. 2018; Rodriguez de Souza et al. 2023; Vilar et al. 2007; M Sanaa et al. 1993; Rodriguez et al. 2021). En France, les prévalences dans les ensilages et enrubannages représentent respectivement 7,5 % et 4,1% (Gautier et al. 2003). Les échantillons positifs sont plus souvent associés à des pH élevés des ensilages/enrubannages (>4.6) marquant une perte de maîtrise. Concernant la contamination liée à un défaut d'hygiène de la traite, des souches de *L. monocytogenes* ont été associées à la colonisation des installations de traite en lien avec leur capacité à former des biofilms dans cet environnement (Kostakioti, Hadjifrangiskou, and Hultgren 2013; Latorre et al. 2011). S'il

n'est pas correctement nettoyé et désinfecté, le matériel utilisé pour la traite peut introduire des contaminants dans le lait de tank, ou s'il y a une conception hygiénique insuffisante. En outre, une étude a montré que le risque relatif que les génotypes présents dans le système de traite soient présents dans les laits de tank était 7 fois plus élevé que pour les génotypes issus des autres échantillons de l'environnement (Castro et al., 2018). De plus, une étude a montré que la prévalence des souches persistantes de *L. monocytogenes* dans les fermes variait de 4 à 16 %, la prévalence la plus élevée correspondant aux fermes avec une mauvaise hygiène des locaux (H. Castro et al. 2018) .

Le modèle considère que la bonne application de l'hygiène dans la ferme n'est pas indépendante de la bonne application des règles d'hygiène dans la salle de traite. Il est ainsi exclu d'avoir une bonne hygiène à la traite dans une ferme ayant une mauvaise hygiène d'entretien des locaux et du matériel.

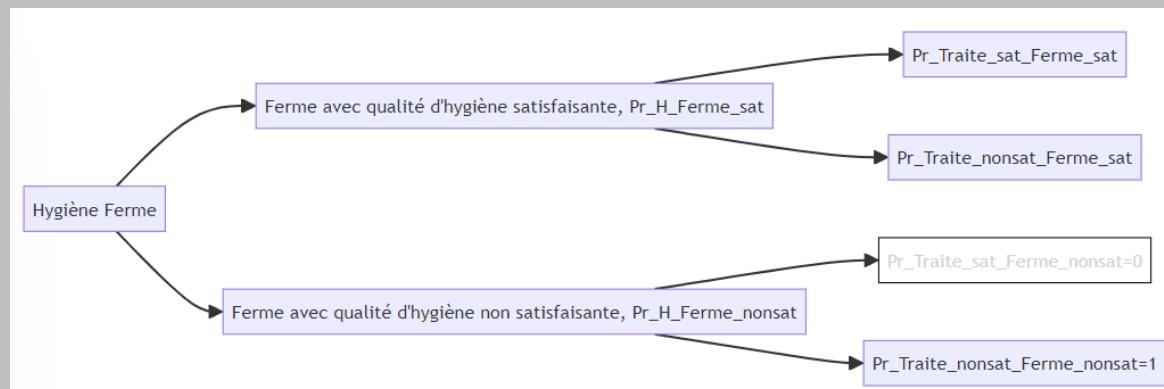
Contamination des laits de tanks par *L. monocytogenes*

Les deux raisons de contamination du lait de tank par *L. monocytogenes* sont les mammites et (ou) un manque d'hygiène (h) :

$$p_{Lmono} = 1 - (1 - p_{Lmono}^{mammite}) \times (1 - p_{Lmono}^h)$$

La prévalence de mammite ne dépend pas des fermes (alimentation, hygiène) ni de l'hygiène de la traite; elle dépend de la capacité de l'éleveur à détecter les mammites. Elle passera donc d'une valeur actuelle (fournie par l'interprofession ou un expert) à zéro en cas de maîtrise de la part de l'éleveur.

Les deux voies de contamination du lait via une hygiène défective (hygiène ferme et hygiène traite) ne sont pas indépendantes, par exemple il est exclu d'avoir une bonne hygiène à la traite dans une ferme ayant une mauvaise hygiène d'entretien des locaux et du matériel.



La probabilité de contamination en lien avec l'hygiène est estimée à partir des probabilités de contamination des fermes dans les fermes avec une hygiène satisfaisante (H_{sat}^{Ferme}) et non satisfaisante (H_{nonsat}^{Ferme}) :

$$p_{Lmono}^h = Pr \left(conta - traite / H_{sat}^{Ferme} \right) \times Pr (H_{sat}^{Ferme}) + Pr \left(conta - traite / H_{nonsat}^{Ferme} \right) \times Pr (H_{nonsat}^{Ferme})$$

Dans les fermes avec hygiène satisfaisante, la contamination est estimée à partir de la probabilité de contamination dans les fermes avec des bonnes maîtrise de l'hygiène des équipements de traite ($Pr_{Ferme-sat}^{Traite-sat}$), de la probabilité de contamination dans celles qui ne maîtrisent pas ($Pr_{Ferme-sat}^{Traite-nonsat}$) et du pourcentage de chaque type de ferme ($(1 - \%_{Ferme-sat}^{equipement-sat})$)

$$Pr\left(conta - traite / H_{sat}^{Ferme}\right) = Pr_{Ferme-sat}^{Traite-sat} \times \%_{Ferme-sat}^{equipement-sat} + Pr_{Ferme-sat}^{Traite-nonsat} \times (1 - \%_{Ferme-sat}^{equipement-sat})$$

La probabilité de contamination des tanks dans les fermes avec une hygiène non satisfaisante est déterminée à parti du facteur de risque lié à la mauvaise maîtrise de l'hygiène (Sanaa et al., 1993) :

$$Pr\left(conta - traite / H_{nonsat}^{Ferme}\right) = F_{hyg_Lm} \cdot Pr\left(conta - traite / H_{sat}^{Ferme}\right)$$

4.2.1.2 Fabrication des fromages

Lors de la fabrication des fromages PM et PPNC, certains facteurs peuvent avoir un impact sur la maîtrise des dangers STEC, *Salmonella* et/ou *L. monocytogenes*. Le comportement (croissance, survie et/ou inactivation) des trois agents dans le lait et les fromages au cours des étapes de transformation, d'affinage et de conservation est simulé en fonction de la durée des étapes et des paramètres physico-chimiques du produit (température, pH, activité de l'eau (a_w)) par des modèles de microbiologie prévisionnelle présentés dans l'encadré ci-dessous. Les paramètres cardinaux (paramètres correspondant aux conditions limites et optimales de croissance en milieu de culture) et le taux de croissance optimal sur fromage (μ_{optfro}) (paramètre du modèle secondaire de croissance spécifique de la combinaison danger/fromage/espèce animale) sont issus de la littérature (Anses 2018a; FDA and Health Canada 2015; Gonzales-Barron et al. 2022).

Le choix des ferment d'acidification avec de fortes propriétés compétitives, permettant d'obtenir une chute de pH dans le bas de la gamme correspondant à la technologie concernée (PM ou PPNC) pendant la formation du caillé, a un impact sur le potentiel d'évolution des trois pathogènes pendant cette étape de la fabrication. La surveillance du pH jusqu'à l'obtention du caillé permet de vérifier cette cinétique. La Figure 9 présente la variabilité des cinétiques d'acidification pour les deux technologies. Dans le scénario de référence, le GT considère un profil d'acidification médian. Pour le scénario testé, basé sur l'utilisation de ferment induisant une acidification rapide, le profil correspond au profil le plus rapide (borne inférieure de l'intervalle de variabilité).

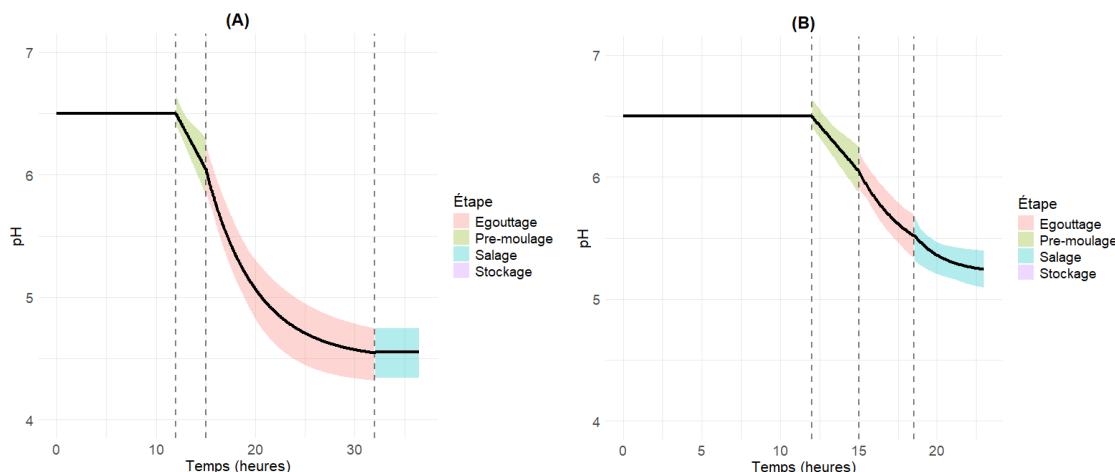


Figure 9 Profils possibles d'acidification pour les fromages à pâte molle (A) (d'après Perrin et al. 2015) et à pâte pressée non cuite (B) (d'après Anses, 2018).

Le choix de souches productrices de molécules inhibitrices permet de limiter la croissance de *L. monocytogenes* en surface des fromages pendant l'affinage. Cet effet peut être pris en compte dans la modélisation au travers d'un des paramètres (μ_{optfro}) du modèle de microbiologie prévisionnelle (cf. encadré ci-dessous). De nombreuses études de la littérature montrent l'effet des bactériocines (Ennahar, Assobhei, and Hasselmann 1998; Izquierdo et al. 2009; Markus C Carnio, Höltzel, et al. 2000; Eppert et al. 1997; O'sullivan et al. 2006) mais elles ne permettent pas de quantifier directement l'impact sur (μ_{optfro}). Le GT a retenu une étude qui permet de quantifier l'impact des certaines souches lactiques (et donc indirectement l'effet des molécules inhibitrices produites) sur la croissance de *L. monocytogenes* et donc sur la valeur de ce paramètre (Cadavez et al. 2019).

L'allongement de la durée de l'affinage peut permettre une diminution de la population de *Salmonella* et de STEC. Pour les STEC O26:H11 l'inactivation est moins importante que pour les STEC en général (Stéphane D Miszczycza et al. 2013). L'inactivation des STEC est plus importante dans le cœur que dans la croûte pour les PMCF et, à l'inverse, plus importante dans la croûte que dans le cœur pour les PPNCC (S. D. Miszczycza et al. 2016; Stéphane D Miszczycza et al. 2013).

Par ailleurs, une hygiène renforcée de l'environnement de production permet de limiter les contaminations par *L. monocytogenes* pendant la fabrication. Pour les PM et les PPNCC, la durée d'affinage n'est pas une mesure de maîtrise vis-à-vis de *L. monocytogenes* car ce pathogène peut croître pendant l'affinage. Cependant, sa croissance est moins importante au cœur du fromage que sur la croute car le pH y reste plus bas, ce qui justifie la mesure de maîtrise de retrait de la croute.

Le GT a fait le choix de ne pas inclure de phase de latence avant croissance des trois agents pathogènes, considérant qu'ils se trouvent dans de bonnes conditions de croissance au début de la fabrication des fromages (pH, a_w et température).

Modèles de microbiologie prévisionnelle

Les cinétiques de croissance ont été modélisées à l'aide du modèle primaire logistique avec rupture :

$$\frac{dy}{dt}(t) = \mu_{max} (t) \times y(t) \times \left(1 - \frac{y(t)}{y_{max}}\right)$$

Où y est la taille de la population bactérienne (unité), y_{max} est la population maximale en phase stationnaire (unité), t est le temps en heure et μ_{max} est le taux de croissance maximal.

La vitesse de croissance exponentielle des pathogènes dépend des conditions de température de pH et d' a_w . L'impact de ces facteurs a été modélisé à l'aide de modèles cardinaux sans interaction :

$$\mu_{max} = \mu_{opt} \times \gamma(T) \times \gamma(pH) \times \gamma(a_w)$$

avec

$$\gamma(T) = \frac{(T - T_{\max})(T - T_{\min})^2}{(T_{opt} - T_{\min})((T_{opt} - T_{\min})(T - T_{\min}) - (T_{opt} - T_{\max})(T_{opt} + T_{\min} - 2T))}$$

$$\gamma(pH) = \frac{(pH - pH_{\max})(pH - pH_{\min})}{((pH_{opt} - pH_{\min})(pH - pH_{\min}) - (pH_{opt} - pH_{\max})(pH_{\min} - pH))}$$

$$\gamma(aw) = \frac{(aw - aw_{\min})}{(aw_{opt} - aw_{\min})}$$

Pour *Salmonella* et STEC, une phase d'inactivation intervient à partir de la fin de la coagulation et se poursuit pendant l'affinage et le stockage jusqu'à la consommation.

La décroissance est modélisée à l'aide du modèle d'inactivation log-linéaire, basé sur les travaux de Bigelow (Bigelow 1921), classiquement employé en microbiologie alimentaire $\log_{10}(N(t)) = \log_{10}(N_0) - t/D$

La vitesse d'inactivation ($p=1/D$) dépend du sous-type de STEC (Perrin et al. 2015). Elle est plus lente pour le sérotype O26 (Miszczycha et al 2013).

Le modèle de Weibull (Mafart et al. 2002) est utilisé pour *Salmonella*. La valeur des paramètres a été établie sur plusieurs souches dont *Salmonella* Dublin (Basak et al. 2024) :

$$\log_{10}(N(t)) = \log_{10}(N_0) - \left(\frac{t}{\delta}\right)^p$$

Pour les deux pathogènes, la différence d'inactivation entre le cœur et la croûte est basée sur des données de challenge-tests dans les fromages des catégories PMCF et PPNCC (Stéphane D Miszczycha et al. 2013).

4.2.1.3 Description des consommateurs

Les données de consommation de fromages issues de l'enquête INCA3 (2014-2015) ont été utilisées. Cette enquête est basée sur une méthode d'échantillonnage aléatoire stratifiée en trois étapes (unités géographiques, ménages et individus) utilisant la base de données du recensement national (Carine Dubuisson et al. 2019). Les données de consommation portent sur 4 114 individus âgés de 1 à 79 ans. Une correspondance entre les individus INCA3 et les classes d'âge correspondant aux recommandations d'éviction a été établie.

Le premier élément a été de relier les données de consommation aux catégories de fromages utilisées dans l'appréciation quantitative des risques. Ensuite, les fréquences de consommation par classe d'âge ont été déterminées pour chaque catégorie de fromage. La taille des portions de fromages a également été déterminée par catégorie de fromage, en considérant que la classe d'âge n'influait pas la taille de la portion. Le GT a raisonné à volume de production constant pour un lot donné. Afin de prendre en compte les mesures de maîtrise en lien avec l'éviction de consommation, et considérant que la taille des lots doit rester la même pour ce scénario, le GT a considéré que les portions non consommées par ces populations étaient attribuées aléatoirement aux populations non sensibles.

Concernant les conditions de conservation, les informations d'INCA3 sur les températures de réfrigération provenant de plus de 3 500 foyers ont été utilisées. On considère que les températures mesurées sont représentatives de la température des réfrigérateurs des individus tout au long de l'année. Pour le scénario de base, on considère que chaque fromage est conservé à une température tirée de la distribution empirique des températures mesurées.

Le GT a retenu l'hypothèse que les fromages sont remis à température ambiante uniquement dans les deux heures précédant la consommation. Pour les scénarios avec une amélioration des conditions de conservation, les valeurs supérieures au seuil testé sont retirées de la distribution empirique des températures.

Afin de prendre en compte la durée entre l'achat et le moment de la consommation, la distribution des durées de stockage a été modélisée à l'aide d'une loi triangulaire. Les paramètres de la distribution triangulaire sont spécifiques des fromages à pâte molle (Perrin et al., 2015) et des pâtes pressées non cuites à affinage court (Anses 2018a). Afin de tester une réduction des durées de stockage, la durée maximale de la loi de distribution a été ramenée de 24 jours à 17 jours pour les fromages à pâte molle, et de 60 jours à 50 jours pour les fromages à pâte pressée non cuite.

Pour simuler la croissance potentielle de *L. monocytogenes* pendant la conservation chez les consommateurs, le même modèle de croissance et d'impact de la température sur la vitesse de croissance que ceux utilisés pour l'affinage ont été employés. Pour *Salmonella* et STEC, les mêmes modèles d'inactivation que ceux utilisés pour l'affinage ont été utilisés.

4.2.2 Cas de la production fermière

Le schéma de la Figure 10 reprend le modèle de Monte Carlo développé dans cette étude pour les fromages au lait de vache issus de production fermière.

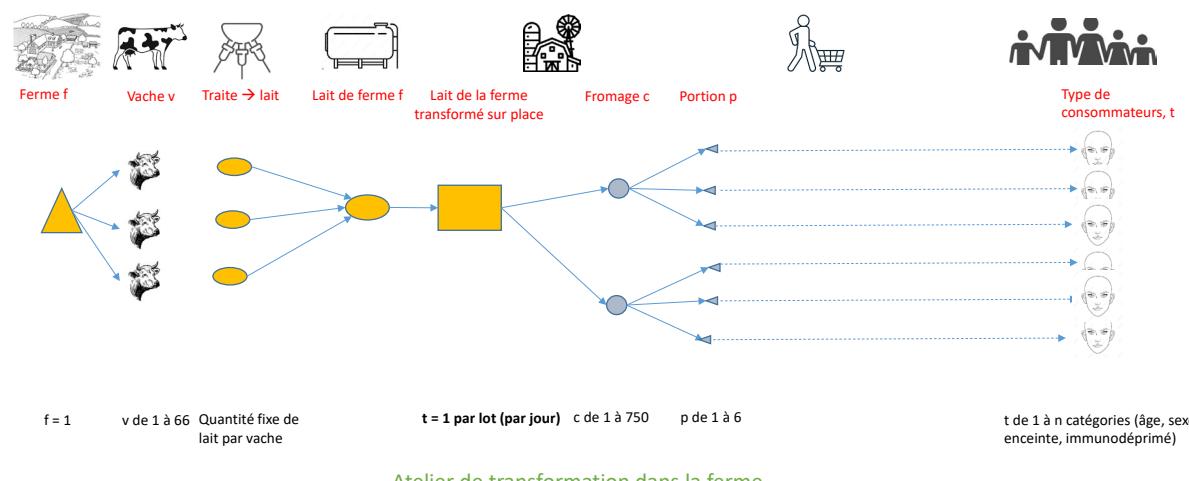


Figure 10 : Schéma pour les fromages au lait de lait de vache dans le cas de la transformation fermière. Les mesures de maîtrise peuvent conduire à éliminer une ferme, une vache, le lait issu d'une ferme, un lot issu d'un atelier fermier, un type de consommateurs

Les différences avec le modèle développé pour les productions industrielles sont de deux ordres¹² :

- Certaines des valeurs numériques sont différentes : le nombre de fromages par lot et la variabilité de pH pendant la coagulation (pour 90% des lots, la variabilité est similaire à celle de la production industrielle, pour 10% des lots il y a une perte de maîtrise de l'acidification avec des pH finaux avec un décalage de 0,5 unité pH). Ces valeurs spécifiques ne changent pas la structure du modèle ni les hypothèses émises.

¹² Le comportement du consommateur n'a pas été considéré comme différent qu'il s'agisse de fromages fermiers ou de productions industrielles faute de données spécifiques.

- Les mesures de surveillance qui s'appliquent en production fermière peuvent être différentes de celles qui s'appliquent en production industrielle. Ceci n'a pas d'impact sur la structure du modèle mais a un impact sur les sorties du modèle. Les différences ont été listées dans le tableau 5.

4.2.3 Spécificités liées aux caprins et ovins

Le modèle d'appréciation des risques a d'abord été développé pour les fromages fabriqués au lait de vache. Le modèle conceptuel reste le même pour les fromages fabriqués à partir de lait de chèvre et de brebis à l'exception des mesures spécifiques à *Salmonella* Dublin (ce sérotype n'a pas la même importance pour ces deux espèces). Les valeurs des paramètres (nombre d'animaux par troupeaux, nombre de troupeaux collectés pour les fabrications industrielles, prévalence de portage) ont été adaptées le cas échéant.

4.3 Vérification des modules et des modèles d'appréciation des risques

La vérification et la validation des scripts informatiques des modèles AQR a consisté à vérifier que chaque sortie intermédiaire du modèle (nombre d'animaux porteurs, prévalence dans les tanks, croissance ou inactivation pendant la fabrication) soit cohérente avec les connaissances des experts ou des données indépendantes, c'est-à-dire non utilisées pour la construction du modèle (par exemple données de prévalence des plans de surveillance). La documentation du modèle a été réalisée à l'aide du « Food Scientific Knowledge eXchange Format (FSKX) » (Filter, Schüler, and Romdhane 2024). Les fichiers seront déposés sur la plateforme RAKIP (<https://knime.bfr.berlin/landingpage/Rakip-Model-Repository>). Le dépôt du modèle sur cette plateforme est conditionné à la reproduction des résultats à partir du script mis à disposition.

5 Sorties du modèle du scénario de base

5.1 Illustrations des résultats pour les fromages à pâte molle et croûte fleurie au lait de vache et pour le scénario de base

L'objectif de cette section est de présenter le fonctionnement de la modélisation¹³ à travers un exemple de la fabrication (dans les entreprises) des fromages à pâte molle à croûte fleurie élaborés à partir du lait de vache. Elle permet d'illustrer, étape par étape, comment les différentes composantes – depuis la gestion de l'hygiène et de l'alimentation au niveau des fermes jusqu'aux pratiques des consommateurs – interviennent dans les mesures de maîtrise présentées dans la section 3 de ce rapport. Elle permet également d'introduire les sorties intermédiaires, notamment les niveaux de contamination, le pourcentage de lots détectés, le pourcentage de personnes exposées, qui accompagneront le risque pour les différents scénarios. Seule la dimension de variabilité est analysée pour ces sorties intermédiaires. A noter que cette description détaillée des sorties intermédiaires a également permis de vérifier la cohérence des scripts mathématiques.

5.1.1 Module « ferme »

- Description du scénario de base dans le cas d'une seule itération

Le tableau 6 présente les résultats d'une des itérations du module ferme pour les laits de bovins. Il correspond à une journée sur un total de 300 jours simulés par itération. Ces résultats illustrent les principales entrées et sorties du modèle relatives à la gestion de l'hygiène et de l'alimentation dans les fermes, avec en particulier les niveaux de contamination de différents groupes de STEC (STEC du groupe I O26:H11, STEC du groupe I non O26:H11, et les autres STEC), *Salmonella* (*Salmonella* Dublin et autres *Salmonella*) et *L. monocytogenes* dans le lait de tank.

Chaque ligne du tableau représente une ferme distincte comprenant 66 animaux (pour un total de 31 fermes de bovins laitiers) (Annexe 4), avec des données incluant l'identification de la ferme, les pratiques de maîtrise de l'hygiène et de l'alimentation (qualifiées de satisfaisantes ou non), ainsi que les caractéristiques des animaux (nombre d'animaux porteurs pour les différentes catégories de STEC et de *Salmonella* considérées, nombre d'animaux producteurs de lait). Ces caractéristiques (à l'exception du nombre d'animaux producteurs qui peut évoluer si une mesure d'éviction est mise en place et si une ferme est temporairement exclue suite au dépassement du critère d'hygiène *E. coli*) restent identiques pour les 300 jours que composent une itération.

Pour *Salmonella* et STEC, le nombre de ces bactéries pathogènes dans un tank de lait d'une ferme dépend de deux paramètres. Le premier facteur est la quantité de matières fécales transférée dans le tank, laquelle est reflétée par la concentration en *E. coli* (critère d'hygiène) dans ce lait. Le deuxième facteur est la concentration en *Salmonella* et STEC dans les matières fécales, laquelle est variable pour chaque animal porteur de ces bactéries (valeurs non présentées dans le Tableau 6).

¹³ A noter que cette description détaillée des sorties intermédiaires a également permis de vérifier la cohérence des scripts

Pour *L. monocytogenes*, l'entrée du modèle est la prévalence dans le lait de tank de chaque ferme. Cette prévalence dépend du niveau d'hygiène générale et de la maîtrise de l'hygiène des équipements de traite.

Tableau 6 : Illustration des résultats obtenus par simulation d'une journée parmi les 300 jours. Ce résultat est tiré d'une seule itération¹⁴ parmi les 250 réalisées. Cas pour les bovins dans le scénario de base.

Ferme	Niveau de maîtrise satisfaisant (Oui / Non)			Nombre de vaches porteuses parmi les 66 présentes dans chaque ferme					Nombre d'animaux producteurs de lait	Test - <i>E. coli</i>	Concentration en <i>E. coli</i> dans le lait de tank (ufc/mL) le jour <i>j</i>	Quantité de matières fécales transférées dans le tank (g)	Quantité totale en pathogènes dans un tank (ufc/tank) de volume maximum 25 L x nombre d'animaux producteurs de lait								
				STEC		Salmonella							STEC			Salmonella	<i>L. monocytogenes</i>				
	Hygiène	Alimentation	Équipement	group e I O26	groupe I non O26	Autres	Dublin	Autres					group e I O26	groupe I non O26	Autres	Dublin	Autres				
1	O	O	O	0	0	0	0	1	66	N	2,0E-01	2,7E-01	0	0	0	0	0	2309			
2	O	O	O	0	1	0	0	0	66	N	2,4E+00	3,5E+00	0	572	0	0	0	60			
3	O	N	O	1	0	4	0	2	66	N	7,2E-01	1,0E+00	8	0	207	0	0	104			
4	O	O	O	0	0	0	0	0	66	N	3,4E-02	4,6E-02	0	0	0	0	0	3398			
5	O	O	O	0	0	3	0	2	66	O	1,4E-01	2,0E-01	0	0	2	0	0	403			
6	O	N	O	0	0	4	0	0	66	O	1,2E+00	1,7E+00	0	0	19	0	0	1558			
7	O	O	O	0	0	2	0	0	66	N	1,9E-02	2,3E-02	0	0	0	0	0	179			
8	O	O	O	0	0	0	0	2	66	N	3,8E-01	5,4E-01	0	0	0	0	0	710			
9	O	O	O	0	0	1	0	1	66	N	1,5E-01	1,9E-01	0	0	13	0	0	315			
10	O	N	N	0	2	4	1	2	66	N	4,0E-01	5,3E-01	0	0	6	0	2	682			
11	O	O	O	0	0	2	1	0	66	N	3,9E+00	4,6E+00	0	0	25	26	0	146			
12	O	O	O	0	0	0	0	3	66	N	1,2E-01	1,6E-01	0	0	0	0	19	2458			
13	O	O	O	0	0	0	1	2	66	N	1,2E-01	1,5E-01	0	0	0	1	929	66			

¹⁴ Pour une autre itération, la répartition des fermes avec des défauts de maîtrise ainsi que le nombre d'animaux porteurs sera différente suivant un tirage aléatoire dans une loi de distribution (modèle stochastique).

14	O	N	O	0	2	2	0	2	66	N	2,6E-02	3,4E-02	0	0	0	0	0	33
15	O	O	O	0	0	0	0	2	66	N	1,2E-02	1,5E-02	0	0	0	0	0	26
16	O	N	O	0	0	3	0	4	66	N	6,8E-03	8,7E-03	0	0	0	0	3	317
17	O	O	O	0	0	3	0	0	66	O	1,6E+00	2,0E+00	0	0	10	0	0	264
18	O	O	O	0	0	0	2	0	66	N	5,8E+00	7,2E+00	0	0	0	1558	0	5344
19	O	O	O	0	0	0	1	1	66	N	4,7E+00	6,6E+00	0	0	0	25	6	107
20	O	O	O	0	1	1	2	0	66	N	2,8E+00	4,1E+00	0	13	79	442	0	1098
21	O	O	O	1	0	0	0	1	66	N	1,5E-01	1,9E-01	0	0	0	0	5	258
22	O	O	O	0	0	0	0	2	66	N	2,0E+01	1,0E+01	0	0	0	0	24	532
23	O	N	O	0	0	4	0	0	66	N	3,0E-01	4,8E-01	0	0	1	0	0	4957
24	O	O	O	0	0	1	0	2	66	N	6,5E-02	9,0E-02	0	0	0	0	1	256
25	N	O	N	1	1	1	1	4	65*	N	4,0E+01	1,0E+01	558	521	0	2058	90	2010
26	O	O	O	0	0	1	0	0	66	N	2,2E-01	2,7E-01	0	0	0	0	0	1474
27	O	N	N	1	0	2	0	0	66	N	7,3E-01	9,2E-01	344	0	1	0	0	19571
28	O	O	O	0	1	1	0	2	66	N	6,2E-03	8,7E-03	0	0	0	0	11	2063
29	N	O	N	0	0	1	3	3	66	O	1,3E+02**	1,0E+01	0	0	183	480	243	4441
30	O	O	O	0	1	1	0	2	66	N	9,8E-02	1,1E-01	0	0	0	48	446	
31	O	N	O	2	1	4	1	0	66	N	2,1E-01	2,8E-01	2	5	6	0	0	104

*Cas d'une ferme avec un cas de Salmonellose clinique ; l'animal malade est écarté de la production de lait pendant 10 jours

**Cas d'une ferme non conforme sur le critère d'hygiène *E. coli* et testée ce jour-là ; exclusion de la ferme pendant 1 journée

- Illustration du lien entre mesures de maîtrise et données de sorties du modèle

Dans cette partie, pour les animaux ou le dépassement de valeurs seuils, les moyennes des valeurs au travers des fermes sont présentées. Pour les quantifications des concentrations bactériennes, les médianes ont été utilisées¹⁵.

Une mauvaise maîtrise de l'hygiène et de la qualité de l'alimentation étant un facteur de risque de portage de STEC, le nombre de vaches porteuses est différent selon le type de ferme (Figure 11). Sur 250 itérations, dans les fermes où l'hygiène et l'alimentation sont toutes deux gérées de manière satisfaisante, une moyenne de 1,1 animaux porteurs de STEC par ferme est observée. Dans les fermes où ni l'hygiène, ni la qualité de l'alimentation ne sont satisfaisantes, une moyenne de 3,5 animaux porteurs est observée. Lorsque l'hygiène est satisfaisante mais pas la qualité de l'alimentation, le nombre moyen d'animaux porteurs est de 2,5, tandis que dans le cas inverse, où la qualité de l'alimentation est satisfaisante mais pas l'hygiène, il est égal à 1,9.

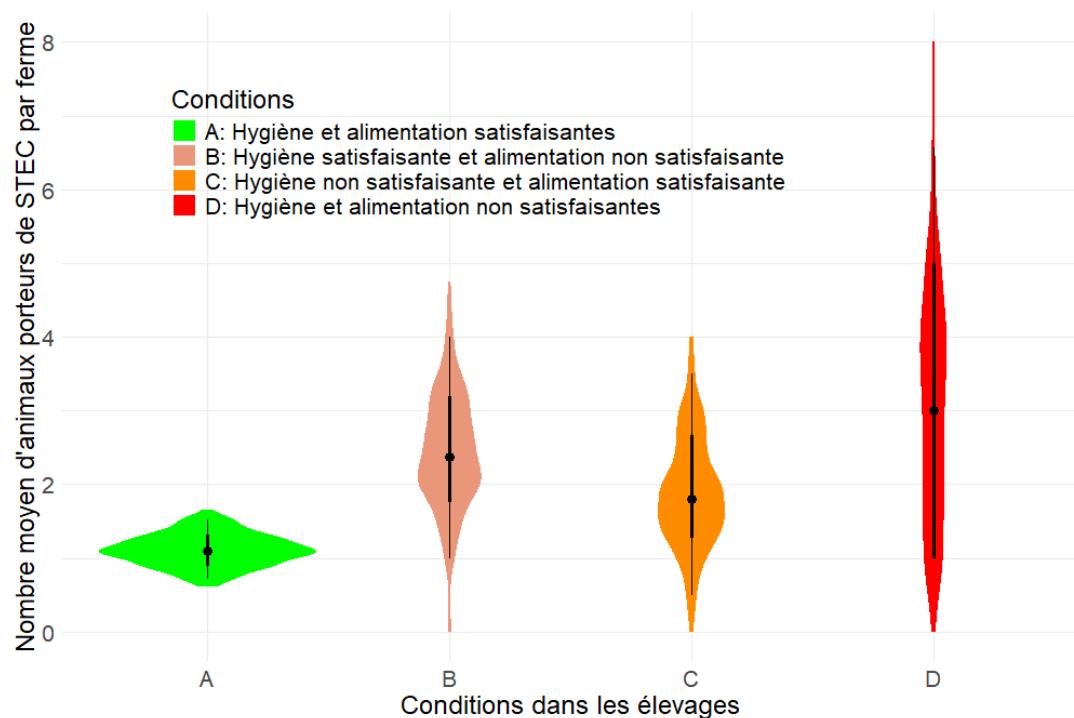


Figure 11 Distribution du nombre moyen d'animaux porteurs de STEC par ferme en fonction du niveau de maîtrise de l'hygiène et de l'alimentation dans les fermes (résultats pour 250 itérations, 66 animaux par ferme au maximum). Les points indiquent la médiane de la distribution, les barres représentent l'intervalle de crédibilité, et la zone de densité illustre la distribution complète des valeurs.

La Figure 12 illustre les contaminations médianes en STEC par type de ferme. Les valeurs de contamination médiane sont 96 fois plus élevées dans les fermes avec une mauvaise maîtrise de l'hygiène et de l'alimentation que dans les fermes avec une bonne maîtrise. Cette plus forte contamination s'explique par le plus grand nombre d'animaux porteurs (cf Figure 11) mais également par la plus grande quantité de matières fécales transférées dans les fermes avec une mauvaise maîtrise.

¹⁵ Les moyennes ont été retenues pour les indicateurs liés aux animaux et aux dépassements de valeurs seuils car ces variables présentent généralement une distribution plus symétrique, facilitant ainsi la comparaison entre groupes. En revanche, les concentrations bactériennes ont souvent une distribution fortement asymétrique (avec présence de valeurs extrêmes). La médiane, robuste face aux valeurs extrêmes, permet alors de mieux représenter la tendance centrale de ces données.

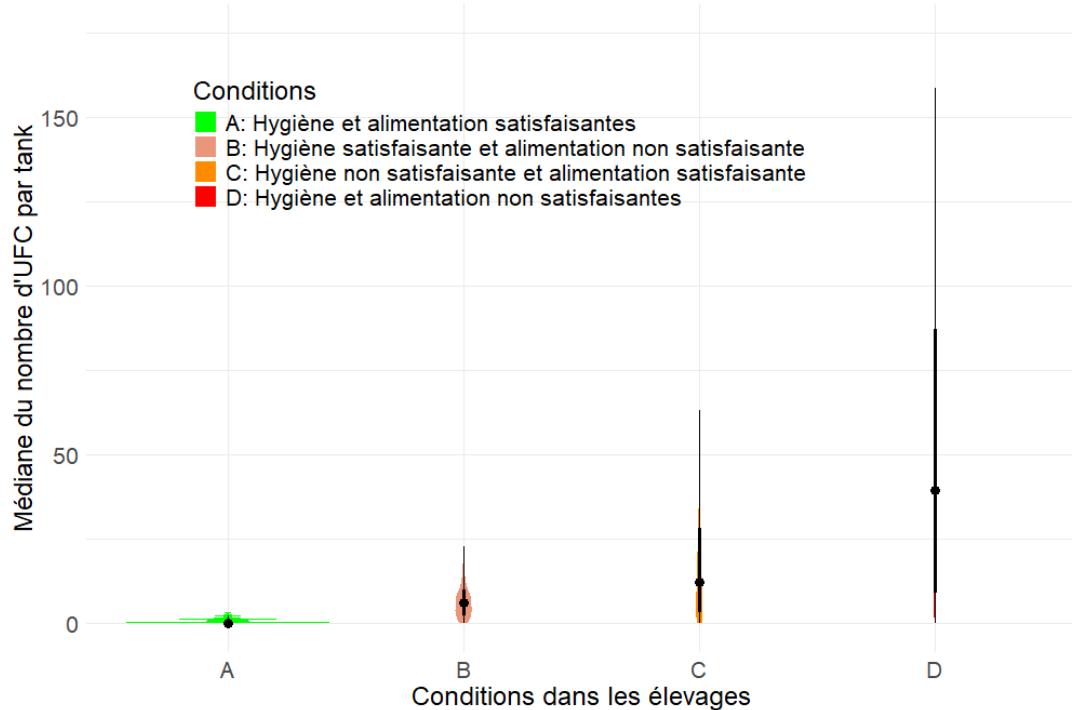


Figure 12 Distribution de la médiane du nombre d'ufc en STEC par ferme en fonction du niveau de maîtrise de l'hygiène et de l'alimentation dans les fermes (résultats pour 250 itérations, dans un volume maximum de 25 L x 66 animaux par ferme). Les points indiquent la médiane de la distribution, les barres représentent l'intervalle de crédibilité, et la zone de densité illustre la distribution complète des valeurs.

Une mauvaise maîtrise de l'hygiène est également un facteur de risque de portage de *Salmonella*. Le nombre de vaches porteuses en fonction de la maîtrise de l'hygiène est présenté dans la Figure 13. Dans les fermes avec un niveau d'hygiène satisfaisant, la moyenne des animaux porteurs de *Salmonella* est de 1,6, tandis que dans celles où l'hygiène est jugée non satisfaisante, cette moyenne s'élève à 4,8.

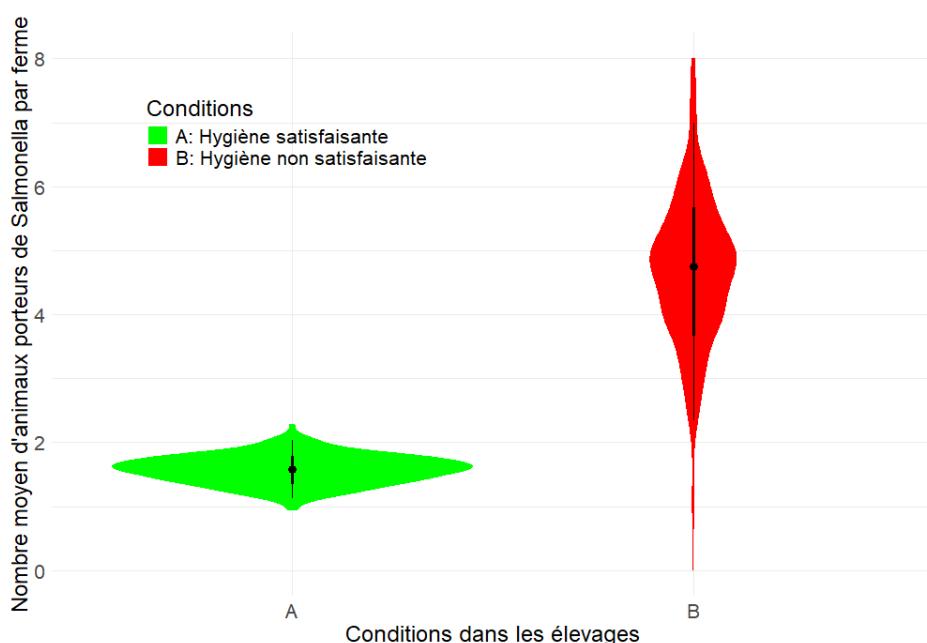


Figure 13 Distribution du nombre moyen d'animaux porteurs de *Salmonella* par ferme en fonction du niveau de maîtrise de l'hygiène (résultats pour 250 itérations, 66 animaux producteurs par ferme au maximum). Les points indiquent la médiane de la distribution, les barres représentent l'intervalle de crédibilité, et la zone de densité illustre la distribution complète des valeurs.

Comme pour les STEC, la quantité de *Salmonella* dans les tanks des fermes avec un mauvais niveau d'hygiène est plus élevée que dans les fermes avec un bon niveau d'hygiène. La médiane de contamination est 7 fois plus élevée (Figure 14) en cas de mauvaise maîtrise d'hygiène, résultant d'un plus grand nombre d'animaux porteurs et de plus grands transferts de matières fécales. Concernant *Salmonella*, le portage peut conduire pour certains animaux à une salmonellose clinique. Le Tableau 6 présente cette situation dans la ferme #25 : le lait d'un animal n'est pas collecté car il a déclaré une salmonellose clinique (il ne contribue pas à la production de lait et donc à la contamination des tanks pendant les 10 jours d'exclusion associés à la maladie). En moyenne 0,3% de jours de production sont concernés par la mise à l'écart d'un animal atteint de salmonellose pour les fermes avec mauvaise hygiène. Cette proportion est trois fois plus faible dans les fermes avec une bonne hygiène (valeur en lien direct avec le nombre d'animaux porteurs).

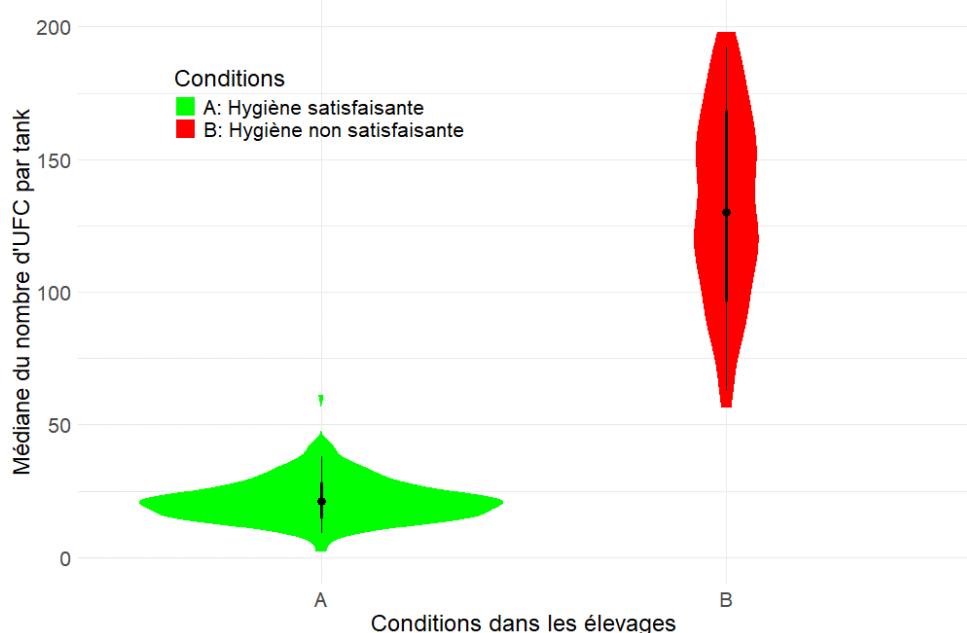


Figure 14 Distribution de la médiane du nombre d'ufc en *Salmonella* par ferme en fonction du niveau de maîtrise de l'hygiène (résultats pour 250 itérations, volume maximum de 25 L x 66 animaux par ferme). Les points indiquent la médiane de la distribution, les barres représentent l'intervalle de crédibilité, et la zone de densité illustre la distribution complète des valeurs.

Dans le cas de *L. monocytogenes* l'entrée du modèle se fait par le lait de tank (cf. 4.2.1.1.4) La Figure 15 illustre la distribution du nombre moyen d'ufc de *L. monocytogenes* par tank selon différentes conditions d'hygiène et d'équipement dans les élevages. Les conditions représentées sont i) les élevages avec une hygiène et un équipement de traite satisfaisants, ii) les élevages avec une hygiène satisfaisante mais un équipement de traite non satisfaisant, et iii) les élevages avec une hygiène et un équipement de traite non satisfaisants. Les médianes calculées d'ufc par tank révèlent des différences entre les conditions avec 604 ufc/tank pour la première catégorie, 866 ufc/tank pour la seconde, et 2 036 ufc/tank pour la dernière catégorie d'élevage.

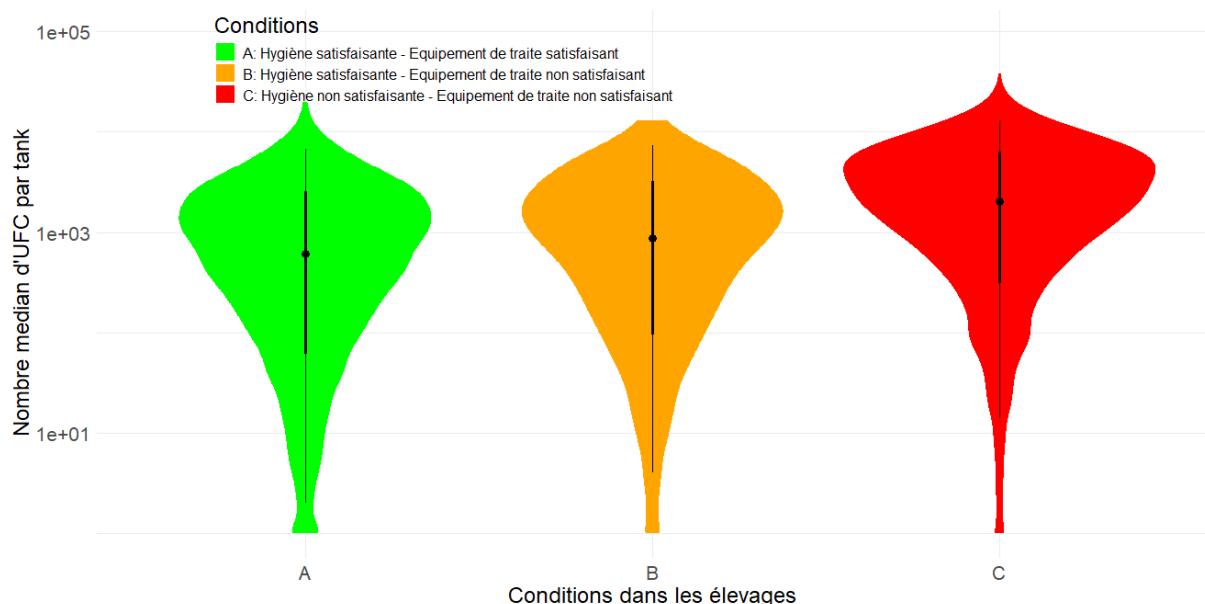


Figure 15 Distribution de la médiane d'UFC de *L. monocytogenes* par tank en fonction du niveau de maîtrise de l'hygiène et des équipements de traite (résultats pour 250 itérations, volume maximum de 25 L x 66 par ferme). Les points indiquent la médiane de la distribution, les barres représentent l'intervalle de crédibilité, et la zone de densité illustre la distribution complète des valeurs.

Enfin, le modèle a permis d'estimer le respect ou non du critère d'hygiène portant sur *E. coli* (concentration > 50 UFC/mL). Le niveau de maîtrise de l'hygiène en élevage a des conséquences sur le nombre de laits de tank dépassant le seuil pour *E. coli* (lié au transfert de matière fécale). Sur la base de 250 itérations et en intégrant sur l'année les résultats (un contrôle tous les 10 jours soit 30 contrôles par an), la Figure 16 montre la distribution du nombre moyen de dépassements de ce critère au cours d'une année.

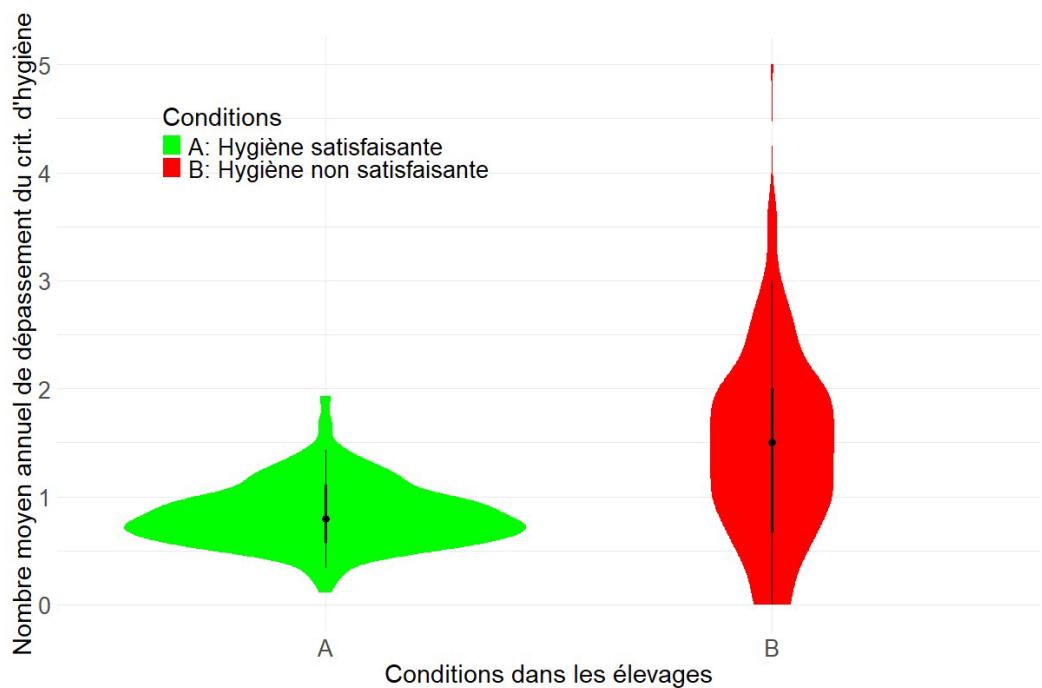


Figure 16 Distribution du nombre médian annuel de dépassements par ferme du critère *E. coli* lors de la surveillance des laits de tank (limite de 50 UFC/mL, pour 30 contrôles annuels et donc pour un maximum de 30 dépassements possibles)

Dans les élevages ayant un niveau d'hygiène satisfaisant, la moyenne annuelle du nombre de dépassements est de 0,86 contre 1,57 dans les fermes ayant un niveau d'hygiène non-

satisfaisant. A noter que 5% des fermes ayant un niveau d'hygiène non-satisfaisant ont plus de 3 alertes dans l'année pour 30 contrôles effectués.

A titre d'illustration, dans le tableau 6, la ferme #29 présente une concentration d'*E. coli* supérieure à la limite de 50 ufc/mL utilisée comme valeur seuil dans le scénario de base. Cette ferme sera exclue une journée de la production au lait cru car elle fait l'objet d'un test sur le critère d'hygiène ce jour-là (pour rappel, les laits des fermes sont testés tous les dix jours dans le scénario de base).

5.1.2 Module « fabrication »

- Réception des laits

Le module fabrication commence par la réception des laits de ferme dans la fromagerie. Pour un lot de lait donné, son volume correspond exactement à la totalité des volumes des laits issus des fermes collectées. Les caractéristiques microbiologiques correspondent à la somme des contaminations microbiologiques des laits de fermes. A partir de ces caractéristiques, il est possible de déterminer l'efficacité de la surveillance du lot de lait servant à la fabrication des fromages.

La Figure 17 présente la variabilité de la concentration en STEC (tout STEC, ceux du groupe I et pour ceux du groupe I O26) dans les tanks de la fromagerie collectant les laits des 31 fermes. Cette figure correspond à une seule itération du modèle, soit les 300 lots d'une année de production (1 lot/jour). Tous les tanks de fromagerie contiennent au moins 1 ufc de ce danger. La figure 17 présente également la proportion des laits dont la concentration dépasse 1 ufc par tank, 1 ufc/L et la limite de détection (« LOD » de 0,2 ufc/mL) (par exemple 16 concentrations parmi les 300 de cette itération dépassent la LOD et pourraient être détectées).

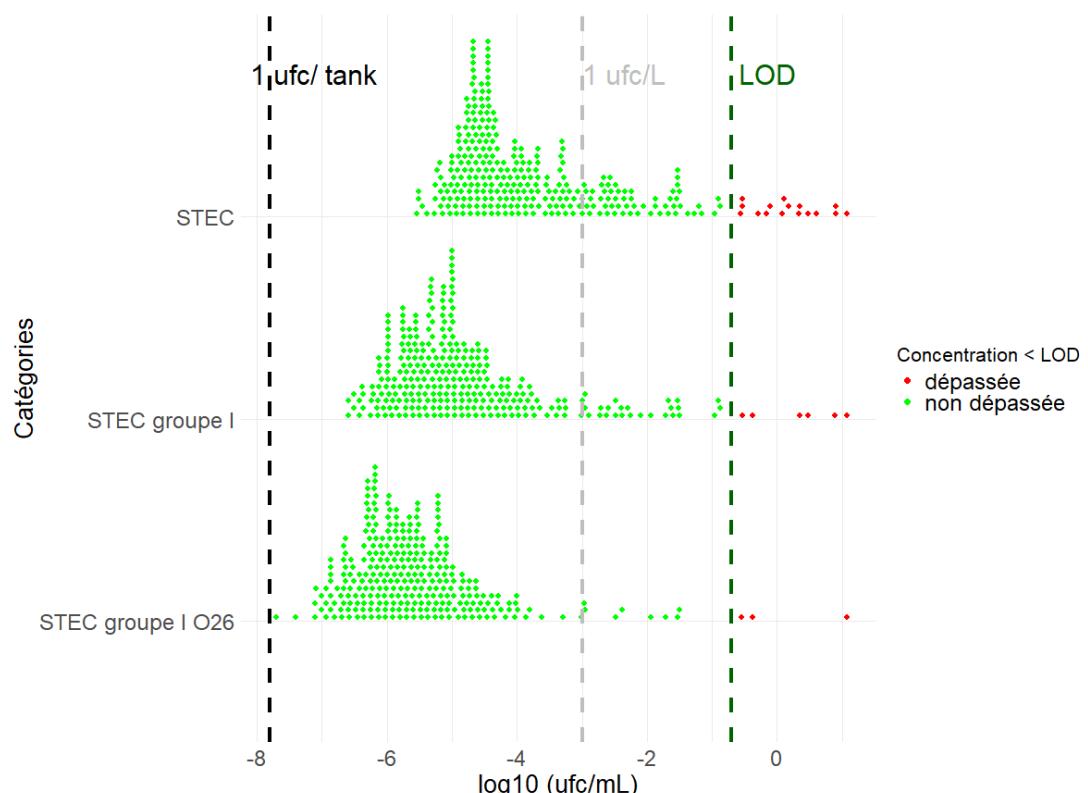


Figure 17 : Distributions des concentrations en STEC dans le lait de tank des entreprises pour une itération du modèle (31 fermes collectées). LOD : Limite de détection fixée à 0,2 ufc/mL.

La Figure 18 présente le nombre de lots dont la concentration dépasse la LOD pour 250 itérations. Les dépassements attendus sont de 6% pour les STEC (dont 33 % pour les souches du groupe I et 67% du groupe III (non présenté dans le graphe). Concernant les dépassements d'*E. coli*, 10,2% des lots dépassent le seuil de 50 ufc/mL de lait.

Pour *Salmonella* et *L. monocytogenes*, la probabilité d'observer un lot positif parmi les 300 lots de l'année est plus faible (respectivement 0,4% et 0,1%) (données non représentées).

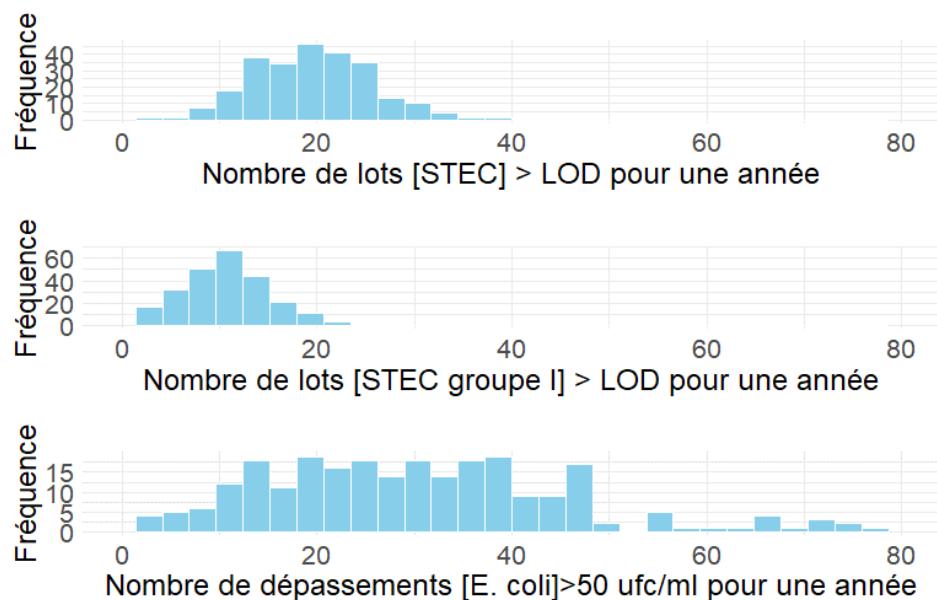


Figure 18 Distribution du nombre de lots positifs à STEC, STEC groupe I ou *E. coli* (selon le plan d'échantillonnage retenu dans le scénario de base) pour une année de production de 300 lots (résultats pour 250 itérations).

- Croissance pendant les premières étapes de fabrication

Après une étape de stockage, le lait subit plusieurs étapes de transformation, incluant le caillage, le moulage, l'égouttage, le salage et l'affinage. Les caractéristiques de température et de pH jusqu'au salage sont présentées dans la figure 19 pour la catégorie des fromages PMCF. Elles ont été considérées dans le modèle comme des valeurs non stochastiques (sans variabilité). A partir de ces données, des valeurs d'activité de l'eau (a_w de 0,99 jusqu'à l'égouttage, puis 0,97 après le salage) et des valeurs cardinales de croissance des différents agents pathogènes, un taux de croissance pour les micro-organismes d'intérêt est déterminé.

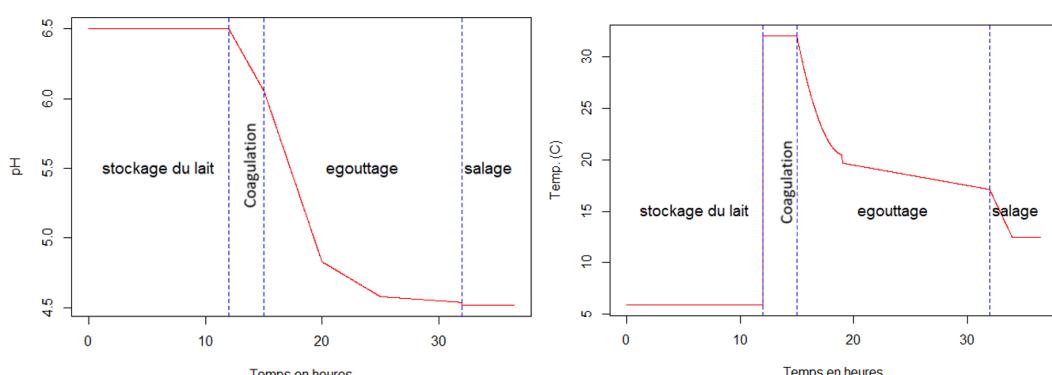


Figure 19 Évolution du pH et de la température, durant les étapes de stockage du lait, de caillage, d'égouttage et de salage des PMCF (scénario de base)

Ce procédé peut être séparé en deux phases successives, la phase liquide (lait non caillé) et la phase solide (fromage). Pendant l'étape de coagulation, une croissance (mesurée en ufc/mL) est observée dans la phase liquide pour les trois pathogènes. 90% des cellules bactériennes des trois pathogènes sont considérées comme éliminées du caillé avec le lactosérum en fin d'égouttage (Moez Sanaa, Coroller, and Cerf 2004). Les cellules restantes deviennent immobilisées dans le caillé. À partir de ce stade, le modèle estime la concentration en ufc/fromage.

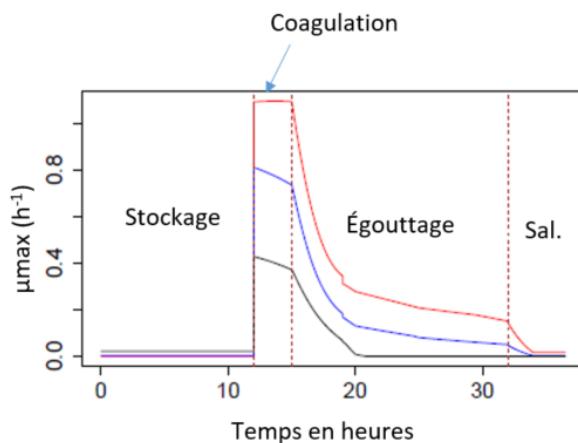


Figure 20 Taux de croissance maximum des trois pathogènes STEC, *Salmonella* et *L. monocytogenes* (respectivement par des lignes rouge, bleue et noire) au cours des quatre premières étapes du procédé de fabrication des PMCF. Elles dépendent des caractéristiques des micro-organismes, de l' a_w , et des conditions de pH et de température présentées dans la figure 19.

Dans la phase solide, la croissance se poursuit pendant la fin de la phase d'égouttage des fromages et de salage. Puis, le taux de croissance devient nul durant la phase de salage (Figure 20).

À la fin de l'étape de salage, les fromages entrent dans l'étape d'affinage, et une diminution de la concentration des pathogènes dans les fromages est alors observée. Pour STEC et *Salmonella*, cette phase d'inactivation est considérée comme un processus continu qui dure jusqu'à la consommation du fromage. Pour les deux agents pathogènes, l'inactivation sur la croûte est moins importante que dans le cœur en raison des conditions de pH (le pH à cœur est plus bas qu'en croûte). De plus, la phase de déclin pour les STEC est modélisée différemment en fonction du sérotype considéré. Les STEC O26 sont moins inactivées que les autres STEC (Figure 21A). Pour *Salmonella*, l'inactivation ne dépend pas du sérotype mais seulement de la zone du fromage (croûte et cœur) (Figure 21B).

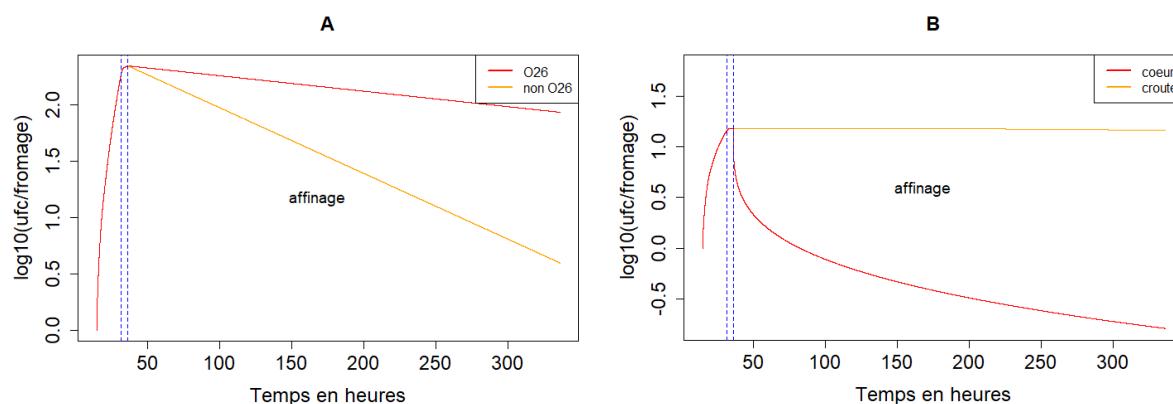


Figure 21 Évolution de la concentration (A) des STEC O26 (trait rouge) et non O26 (trait jaune) dans les fromages (cœur et croûte confondus) et (B) de *Salmonella* dans le cœur et la croûte durant les étapes d'égouttage, de salage et d'affinage pour une contamination de 1 ufc/fromage.

Pour *L. monocytogenes*, il y a une diminution des niveaux de contamination après l'étape de salage (FDA and Health Canada 2015; Moez Sanaa, Coroller, and Cerf 2004). Une seconde phase de croissance intervient ensuite. La reprise de croissance intervient d'abord dans la croûte (avec une variabilité comprise entre 5 et 12 jours après le début de l'affinage) puis dans le cœur (20 jours après le début de l'affinage). Cette reprise de croissance est définie par la remontée de pH différente entre le cœur et la croûte. La croissance des cellules de *L. monocytogenes* provenant de l'environnement de production (1% des fromages contaminés parmi chaque lot sont contaminés à 51 ufc d'après FDA & Health Canada (2015)) ont la même croissance que les cellules de *L. monocytogenes* provenant du lait et présentes dans la croûte des fromages.

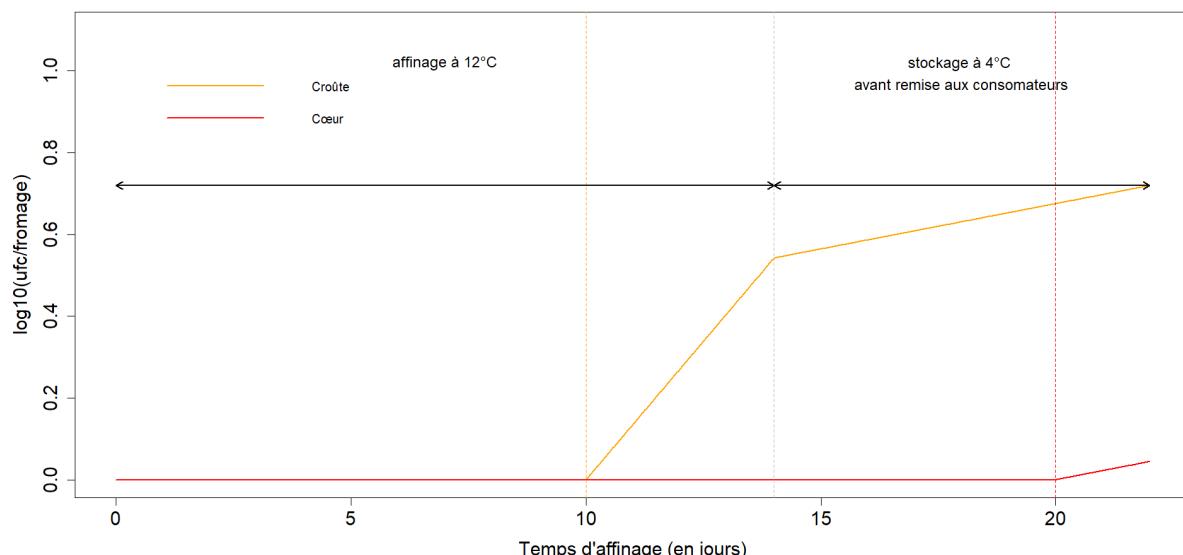


Figure 22 Évolution de la concentration de *L. monocytogenes* pendant l'affinage et le stockage avant remise aux consommateurs de fromages à pâte molle à croûte fleurie pour une contamination initiale de 1 ufc/fromage

5.1.3 Module « consommateurs »

Le module consommateur considère les données de consommation des fromages au lait cru par classe d'âge (Figure 23). L'analyse des données de INCA 3 (C. Dubuisson et al. 2017) montre que la plus forte consommation de fromage au lait cru est associée à la tranche d'âge des 45-64 ans, représentant environ 34 % des consommateurs. Cette tranche d'âge est suivie par celle des 65-79 ans (25 %) puis des 18-44 ans (18 %). Ces données montrent que les enfants en consomment également. Les jeunes enfants de moins de 3 ans en consomment à hauteur de 1%. Cette consommation augmente avec l'âge pour atteindre 4% pour les 4-6 ans et 5% pour les 7-10 ans.

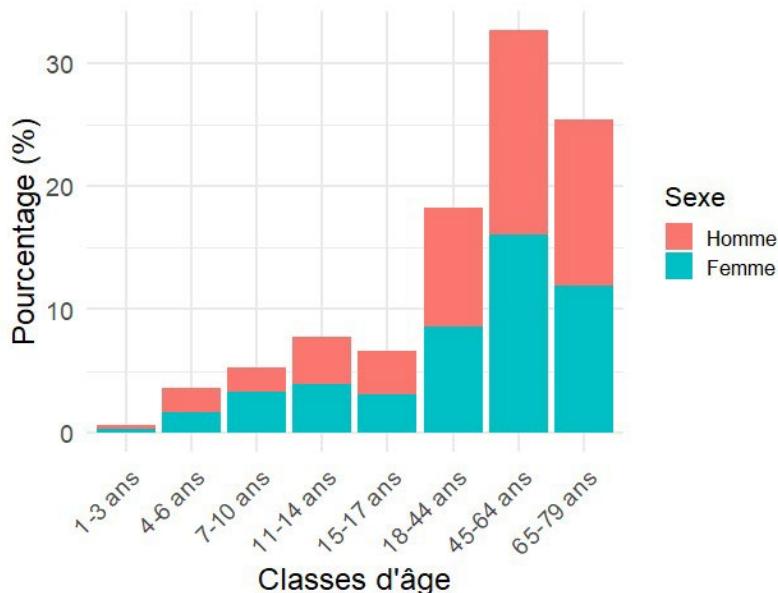


Figure 23 Répartition des consommations des fromages à pâte molle et croûte fleurie (d'après les données de l'enquête INCA3 pour les fromages au lait cru de cette catégorie).

Le modèle « consommateur » considère qu'une unité de vente standard pour les fromages à pâte molle à croûte fleurie est de 250 g, soit 6 portions de 41,6 g chacune. Le GT émet également l'hypothèse selon laquelle les fromages sont achetés par des ménages de composition variable. Selon les données de l'INED¹⁶ et de l'Insee, 38% des ménages français sont constitués d'une seule personne, 32% de deux personnes et le reste de trois personnes ou plus. Par conséquent, les enfants ne peuvent appartenir qu'à des ménages comptant au moins deux personnes. De plus, il est supposé que chaque ménage dispose d'un seul réfrigérateur et que les membres du même ménage partagent un repas commun.

Afin de se rapprocher au mieux des scénarios de consommation et de conservation des fromages à pâte molle à croûte fleurie au sein des ménages français, les informations collectées ont été croisées de la façon suivante :

- Pour les ménages d'une seule personne, la consommation se fait en six prises distinctes, entraînant ainsi six augmentations de température, chacune durant deux heures avant la consommation.
- Pour les ménages de deux personnes, la consommation se fait en trois prises distinctes, entraînant ainsi trois augmentations de température, chacune durant deux heures avant la consommation.
- Pour les ménages de trois personnes ou plus, la consommation se fait au maximum en deux prises distinctes, entraînant ainsi deux augmentations de température, chacune durant deux heures avant la consommation.

La proportion de fromages au lait cru portant une DLC ou une DDM n'étant pas connue, le scénario de base repose sur l'hypothèse selon laquelle tous les fromages ont une durée médiane de conservation au sein des ménages de 12 jours, avec une variation allant de 1 à 38 jours (Figure 24) (Basak et al. 2024).

Les données de température des réfrigérateurs domestiques en France ont également été utilisées (données INCA 3). Les résultats montrent que ces températures varient de 0 à 15°C,

¹⁶ <https://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/chiffres/france/couples-menages-familles/structure-menages/>

avec une médiane à 6°C. Les réfrigérateurs d'une majorité de foyers (70,1 %) ont une température supérieure à 4°C, et 18,4 % des foyers dépassent la température de 8°C.

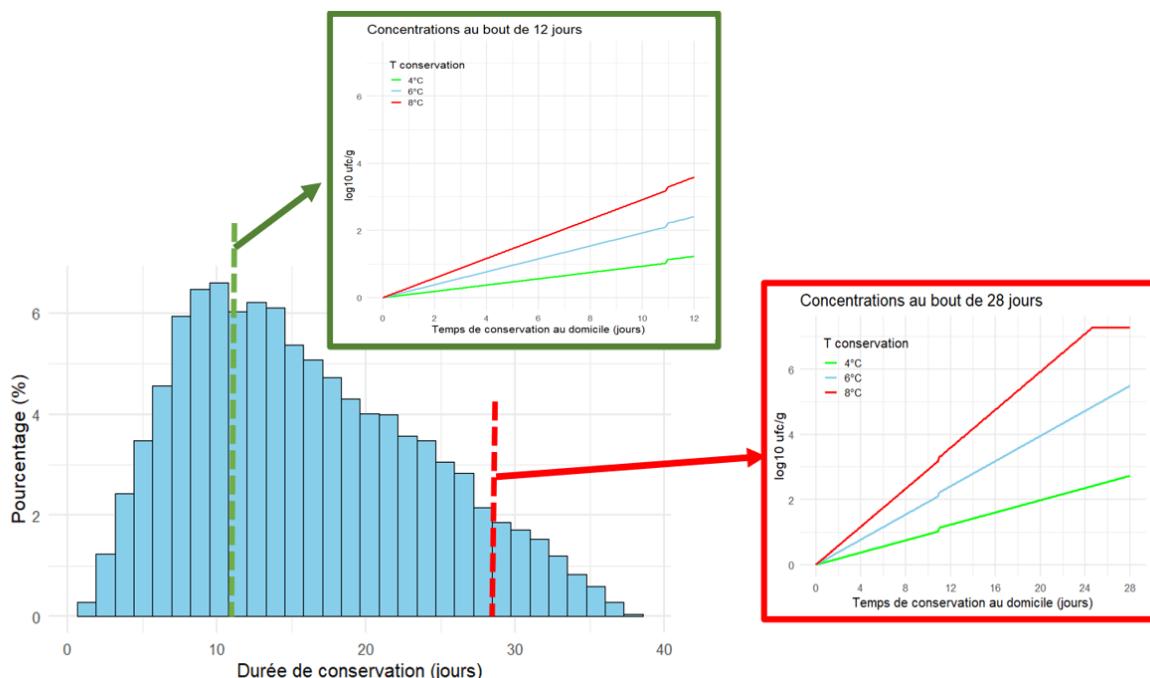


Figure 24 Distribution des durées de conservation chez les consommateurs des PMCF et illustration de l'impact des températures de conservation au réfrigérateur et d'une remise à température à 20°C des fromages pendant 2h sur la croissance (\log_{10} ufc/g) de *L. monocytogenes* avec une contamination initiale de 1 ufc/g.

Le tableau 7 présente les résultats d'une des itérations du module consommateur pour les fromages de type pâte molle à croûte fleurie. Il correspond à une journée sur un total de 300 jours simulés. Les fromages sont distribués dans 50 foyers différents. En entrée du module, on retrouve le nombre et les types de consommateurs qui composent le foyer, la température du réfrigérateur, le nombre de prises alimentaires ainsi que la durée de stockage au réfrigérateur avant chaque prise. En sortie du modèle, on retrouve la réduction minimale des STEC O26:H11 et l'accroissement maximum de *L. monocytogenes* au moment de la dernière prise.

A titre d'exemple, le foyer 1 est composé d'une seule personne de plus de 65 ans qui a un réfrigérateur à 6 °C, cette personne consomme son fromage en six prises, la dernière étant à 32 jours. Lors de cette dernière prise, l'accroissement de *L. monocytogenes* est estimé à 4,4 \log_{10} ufc/g. Les personnes âgées ont été identifiées comme des populations sensibles vis à vis de *L. monocytogenes* (Figure 5) pour lesquels l'éviction est une mesure de maîtrise qui sera testée dans le modèle. Dans le foyer 14 qui comprend au moins trois personnes dont un enfant de moins de 5 ans, le fromage est consommé en deux prises, après 6 et 23 jours de stockage dans un réfrigérateur à 8 °C. Lors de la première prise, la réduction de STEC O26:H11 est estimée à 0,2 \log_{10} ufc/g. Les jeunes enfants sont concernés par une mesure de maîtrise liée à une éviction, cette fois associée au danger STEC (Figure 5).

Tableau 7 : Illustration des résultats obtenus par simulation d'une journée parmi les 300 jours de consommation. Ce résultat est tiré d'une seule itération parmi celles réalisées dans la dimension de variabilité et d'incertitude. Cas pour les fromages de type pâte molle à croûte fleurie contaminés par STEC O26:H11 et *Listeria monocytogenes* dans le scénario de base

Foyers	Nombre de personnes	Personnes sensibles dans le foyer	Temp. du réfrigérateur (°C)	Nb. de prises alimentaires	Nb. de jours de conservation avant chaque prise	Réduction minimale en \log_{10} pendant la conservation pour les STEC O26:H11	Accroissement maximum en \log_{10} pour <i>L. monocytogenes</i> pour la dernière prise
#F1	1	>65ans	6	6	8-11-13-18-21-32	-0,26	4,44
#F2	2		9	3	10-21-32	-0,33	7,28
#F3	2		4	3	9-10-17	-0,3	1,69
#F4	>2		2	2	16-23	-0,53	0,41
#F5	2		11	3	8-13-14	-0,26	7,28
#F6	2		5	3	26-27-29	-0,86	3,3
#F7	2		7	3	15-19-31	-0,5	5,09
#F8	1		2	6	3-11-12-15-17-26	-0,1	0,63
#F9	1		7	6	2-6-8-21-22-33	-0,07	5,33
#F10	1		7	6	6-7-13-14-19-22	-0,2	7,28
#F11	1		11	6	5-5-9-9-13	-0,17	7,28
#F12	1		7	6	6-6-11-19-22-27	-0,2	4,12
#F13	2		3	3	7-24-34	-0,23	2,02
#F14	>2	1 enfant de < 5 ans	8	2	6-23	-0,2	7,28
#F15	>2		5	2	3-23	-0,1	1,72
#F16	2		2	3	18-21-23	-0,59	1,07
#F17	1		6	6	3-8-12-14-14-15	-0,1	5,98
#F18	2		5	3	5-14-20	-0,17	2,58
#F19	2		4	3	12-23-25	-0,4	1,03
#F20	2		11	3	9-12-26	-0,3	7,28
#F21	1		2	6	4-7-8-11-20-25	-0,13	0,99
#F22	2		3	3	4-11-37	-0,13	1,57
#F23	1		8	6	10-11-18-21-25-28	-0,33	7,28
#F24	1		12	6	13-15-18-18-20-33	-0,43	7,28
#F25	>2		8	2	7-15	-0,23	7,28
#F26	2		3	3	9-12-15	-0,3	0,91
#F27	>2		7	2	12-34	-0,4	2,91
#F28	>2		8	2	9-18	-0,3	4,67
#F29	2		6	3	7-15-32	-0,23	2,7
#F30	1		5	6	8-11-13-18-19-34	-0,26	3,01
#F31	>2		12	2	8-25	-0,26	7,28
#F32	2		2	3	9-11-27	-0,3	0,63
#F33	1		3	6	3-9-12-13-14-23	-0,1	1,7
#F34	1		9	6	11-13-14-16-26-32	-0,36	7,28
#F35	>2		5	2	9-22	-0,3	2,29

#F36	>2		7	2	11-32	-0,36	3,88
#F37	>2		9	2	17-22	-0,56	7,28
#F38	1		6	6	8-10-12-16-22-28	-0,26	6,56
#F39	1		4	6	6-9-11-21-23-33	-0,2	2,91
#F40	1		6	6	6-7-7-9-10-35	-0,2	5,01
#F41	1		5	6	7-13-14-17-28-34	-0,23	2,72
#F42	>2		4	2	6-20	-0,2	1,88
#F43	>2		4	2	11-19	-0,36	1,13
#F44	1		4	6	9-9-10-11-15-25	-0,3	2,91
#F45	1		5	6	4-11-14-16-18-31	-0,13	4,01
#F46	2		5	3	11-17-27	-0,36	2,44
#F47	>2		6	2	11-18	-0,36	1,74
#F48	>2		7	2	8-12	-0,26	2,91
#F49	>2		6	2	26-31	-0,86	4,63
#F50	2		10	3	11-16-36	-0,36	7,28

5.1.4 Illustration des sorties du modèle relatives au risque

L'approche adoptée pour évaluer le niveau de risque associé aux mesures actuelles de maîtrise et de surveillance, dans le cadre du « scénario de base » repose sur la combinaison des résultats des trois modules, fermes, transformation et consommation afin de modéliser l'exposition puis d'estimer le risque sanitaire associé à chacun des dangers considérés.

Une illustration des résultats relatifs à *Listeria monocytogenes* est présentée ci-après.

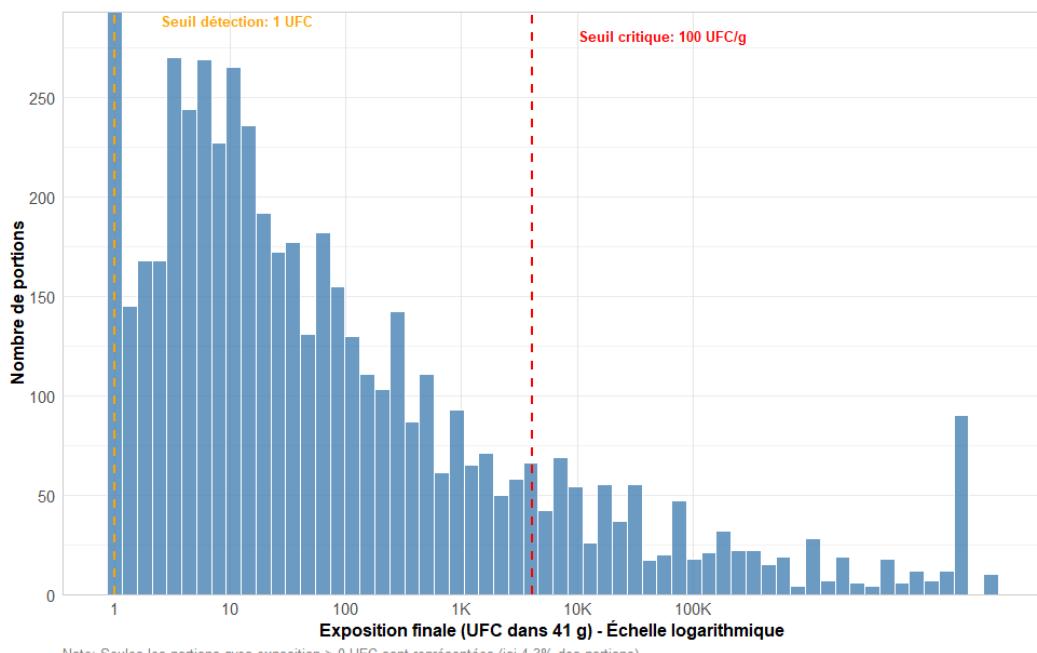


Figure 25 Répartition des quantités de *L. monocytogenes* ingérées dans les portions contaminées du lot #1 de fromages à PMCF.

La Figure 25 illustre la sortie du modèle d'exposition combinant la sortie du module fabrication associée aux caractéristiques de conservation par les consommateurs (temps et température des réfrigérateurs) pour un des lots de fabrication (le lot #1 en l'occurrence). Pour rappel, un lot représente une journée de production de l'atelier de transformation (Figure 6). Pour le lot #1, 20 443 fromages ont été produits (ce nombre tient compte du volume total collecté chaque jour qui dépend des fermes et/ou des animaux écartés de la production de lait cru), correspondant à 122 658 portions de fromage (6 portions par fromage). Pour ce lot #1, 4,3% des portions contiennent au moins 1 UFC de *L. monocytogenes* et 0,7% des portions plus de 100 UFC/g au moment de la consommation (Figure 24).

Les expositions, associées à la virulence des souches et aux caractéristiques des consommateurs (âge...) permettent, à l'aide de la relation dose-réponse, de calculer la probabilité de listériose pour chacune des portions. Le risque de listériose du lot #1 est estimé à partir de la moyenne des risques obtenus pour les 122 658 portions. Ainsi, le risque moyen de listériose est de $1,64 \cdot 10^{-7}$. Le risque est ensuite calculé pour l'ensemble des 300 journées (et donc des 300 lots) d'une itération (cf. Tableau 8). Certains lots peuvent ne pas avoir été commercialisés en raison des différentes mesures mises en place dans le scénario de base (par exemple, dépassement du critère *E. coli* sur le tank mis en production, détection de *L. monocytogenes*, *Salmonella* ou STEC au cours de la fabrication). La moyenne du risque sur une année pour les lots commercialisés constitue le risque pour une itération. La moyenne du risque au travers des itérations sert de sortie du modèle de risque pour une situation donnée (scénario de base pour la situation actuelle ou scénarios à tester).

Tableau 8 : Illustration de la sortie du modèle en termes de calcul de risque par lot puis de risque global annuel

Itération	Lot	Risque moyen au niveau d'un lot	Risque moyen annuel des lots commercialisés	Risque moyen annuel estimé à partir des différentes itérations
1	#1	$1,64 \times 10^{-7}$	$3,97 \times 10^{-7}$	$3,00 \times 10^{-7}$
	#2	$2,21 \times 10^{-6}$		
	#3	Non commercialisé		
		
	#300	$3,58 \times 10^{-7}$		
2	#1	$6,42 \times 10^{-8}$	$9,97 \times 10^{-8}$	
		
3	

Le risque est ensuite exprimé en nombre de cas à l'aide du volume de production de PMCF dans ces conditions de production industrielles (soit 93% des 11089 tonnes produites dans cette catégorie d'après Anses 2022, 7% correspondant à des productions fermières) permettant d'aboutir au nombre de cas par an en France (cf. Partie 5.2).

5.2 Sorties du modèle en prenant en compte la variabilité et l'incertitude pour le scénario de base des 11 combinaisons danger/fromage/espèce animale

Le Tableau 9 présente le risque moyen exprimé par portion, par nombre de cas annuels et par nombre de cas graves annuels pour les différentes combinaisons danger/fromage/espèce animale étudiées dans le cadre de l'évaluation quantitative des risques microbiologiques liés à la consommation de fromages au lait cru. Les résultats sont présentés sous forme de médianes avec leurs intervalles de confiance à 95% (IC 2,5% - IC 97,5%), permettant d'apprécier l'incertitude associée aux estimations. Les données incluent également les estimations de décès associés à chaque combinaison danger/fromage/espèce animale.

Tableau 9 : Médiane et intervalle d'incertitude à 95% du risque moyen pour le scénario de base pour les productions fermières (F) et industrielles (I) (toutes classes d'âge confondues)

Combinaisons		Pro d.	Risque par portion			Nb.de cas annuels			Nombre de cas annuels graves			dont décès		
Fromage	Dang er		Média ne	IC2,5 %	IC 97,5	Média ne	IC2,5 %	IC 97,5	Médian e	IC2,5 %	IC 97,5	Média ne	IC2,5 %	IC 97,5
PMCF bovin	STEC	I	1,7E-05	6,4E-08	7,2E-05	4504	17	1922	95	0	404	1	0	4
		F	1,8E-05	6,8E-08	7,4E-05	330	1	1382	7	0	29	0	0	0
		I	8,4E-07	6,7E-10	7,1E-05	147	0	1241	3	0	261	0	0	3
		F	7,6E-07	6,6E-10	7,0E-05	10	0	918	0	0	19	0	0	0
		I	9,8E-06	4,2E-07	2,2E-05	5144	221	1160	108	5	244	1	0	3
		F	1,1E-05	4,3E-07	2,3E-05	426	17	929	9	0	20	0	0	0
PPNCC bovin	Salm.	I	9,7E-06	2,5E-07	4,5E-05	548	14	2563	12	0	54	0	0	1
		F	9,1E-06	2,3E-07	4,4E-05	36	1	172	1	0	4	0	0	0
		I	6,9E-05	1,0E-05	3,8E-04	18296	2655	1018	384	56	2138	7	1	36
		F	7,7E-05	1,0E-05	3,7E-04	1429	191	6963	30	4	146	1	0	2
		I	1,4E-04	1,3E-05	7,1E-04	25420	2258	1250	534	47	2626	9	1	45
		F	1,3E-04	1,2E-05	7,9E-04	1739	159	1037	37	3	218	1	0	4
PPNCC bovin		I	3,4E-06	3,7E-07	4,3E-05	1793	195	2267	38	4	476	1	0	8

		F	3,3E-06	3,7E-07	4,7E-05	132	15	1867	3	0	39	0	0	1
PMCF bovin	Lm	I	6,3E-08	7,7E-10	1,3E-06	17	0	342	17	0	342	3	0	68
		F	6,8E-08	7,5E-10	1,3E-06	1	0	24	1	0	24	0	0	5
PMCF caprin		I	8,0E-08	1,2E-10	9,7E-07	14	0	171	14	0	171	3	0	34
		F	8,7E-08	1,3E-10	9,9E-07	1	0	13	1	0	13	0	0	3
PMCL bovin		I	2,2E-07	3,4E-09	1,2E-06	7	0	67	7	0	67	1	0	13
		F	6,8E-08	7,5E-10	1,3E-06	1	0	24	1	0	24	0	0	5
PPNCC bovin		I	8,9E-09	7,7E-11	7,9E-08	5	0	42	5	0	42	1	0	8
		F	9,1E-06	2,3E-07	4,4E-05	36	1	172	1	0	4	0	0	0

5.2.1 STEC

Le modèle proposé par le GT FALC2 avec le scénario de base a estimé à environ 235 le nombre de cas de SHU annuels causés par des fromages au lait cru, toutes catégories de fromage confondues, dont 185 cas (79%) de SHU pédiatriques (non présentés). Cette valeur est du même ordre de grandeur que la moyenne annuelle de 172 cas de SHU pédiatriques établie pour la période 2019-2023¹⁷. Cette dernière portant sur toutes les sources de contamination confondues, il y a une surestimation du risque apporté par les fromages au lait cru dans le modèle. Celle-ci pourrait s'expliquer par le fait que le modèle dose-réponse pour les STEC est basé sur une seule épidémie causée par une souche unique appartenant au seul sérotype O157:H7. De plus ce modèle ne prend pas en compte les facteurs de l'hôte (microbiote intestinal, prise d'antibiotiques, ...) pouvant déclencher l'activation des phages et la production concomitante de Shigatoxines, ni l'existence d'un effet seuil (cf section 5.3.1 pour plus de détail).

Par ailleurs, les données épidémiologiques issues des épidémies de SHU causées par des fromages au lait cru montrent que les très jeunes enfants sont principalement touchés. En effet, des médianes de 15 mois, 16 mois et 2 ans ont été respectivement observées pour les épidémies de 2005 (camemberts, 16 cas de SHU ; [8 mois – 6 ans]), de 2019 (Saint-Marcelin et Saint-Félicien, 20 cas de SHU ; [1 mois – 60 mois]) et de 2018 (reblochons, 14 cas de SHU ; [1 an – 5 ans]). Le modèle proposé par le GT FALC2 indique une médiane des âges plus élevée. Le modèle semble donc sous-estimer le nombre de SHU chez les très jeunes enfants (16% [< 3 ans] versus 63% [3 à 15 ans]). Cela pourrait être lié aux données de consommation disponibles (sous-estimation de la consommation dans INCA3), lesquelles pourraient être améliorées grâce au baromètre de Santé publique France qui sera bientôt disponible.

¹⁷ Surveillance du syndrome hémolytique et urémique typique chez l'enfant de moins de 15 ans en France en 2024. Bulletin. Saint-Maurice : Santé publique France, 10 p., octobre 2025.

Enfin, le modèle prédit un risque pour les PMCF qui est assez proche de celui obtenu pour les PPNC. Cette prédiction est cohérente avec ce qui est observé dans le cadre des épidémies causées par des fromages au lait cru (Anses, 2022).

5.2.2 *Salmonella*

Salmonella est l'agent pathogène alimentaire le plus fréquemment confirmé en France et représente 42 % des foyers de TIAC à agent confirmé. En France métropolitaine, Santé publique France (SpF) estime à environ 198 000 le nombre annuel de cas symptomatiques de salmonellose, toutes voies de transmission confondues, dont 183 000 seraient d'origine alimentaire. Les fromages au lait cru sont impliqués dans 34% des 50 épidémies de salmonelloses avec aliment confirmé ayant eu lieu sur la période 2008 - 2018 (Anses 2022). Pour les cas sporadiques, des modèles d'attribution de source (David et al. 2013) montrent que les ruminants (bovins et petits ruminants) représentent moins de 10 % des cas sporadiques de salmonelloses.

Le modèle développé dans cette saisine estime à près de 49 000 le nombre annuel de cas d'infection à *Salmonella* associés à la consommation de fromages au lait cru, toutes catégories de fromage confondues. Ce chiffre suggère qu'environ 27 % des salmonelloses d'origine alimentaire en France seraient attribuables à ce type de produit. Le modèle évalue également à environ 1 000 le nombre annuel de cas graves liés à la consommation de fromage au lait cru. Cette estimation est cohérente avec les données de SpF, qui recense en moyenne 4 106 hospitalisations pour salmonellose par an, tous aliments confondus (D van Cauteren et al. 2018). Enfin, le nombre de décès imputables à la consommation de fromages au lait cru est estimé à 17 cas par an par le modèle, ce qui est cohérent avec les estimations de SpF (67 décès liés à des salmonelloses d'origine alimentaire) (D van Cauteren et al. 2018).

Parmi les cas de salmonellose liés à la consommation de fromages au lait cru, le modèle attribue 40 % des cas aux fromages à PMFCb, et 55% pour les fromages à PMCFc et, dans une moindre mesure, des fromages à PPNC au lait de vache (4 %). Ces résultats sont légèrement en décalage avec les données épidémiologiques pour lesquelles la proportion des PMCF et PPNCC est plus équilibrée (Anses, 2022).

5.2.3 *L. monocytogenes*

Le modèle proposé par le GT FALC2 a estimé à 50 le nombre de cas annuel de listériose pour les fromages au lait cru, soit un ordre de grandeur équivalent au nombre d'infections à *Listeria monocytogenes* liées à la consommation de fromages en France. En effet, en France métropolitaine, 400 à 500 cas de listériose sont répertoriés chaque année (EFSA and ECDC 2024; Leclercq et al. 2024). Le taux d'exhaustivité des souches humaines des cas de listériose invasive est de 98% (Leclercq et al. 2024). Le principal mode de contamination des cas est alimentaire. L'analyse de la distribution de l'âge des cas de listériose de 2013 à 2023 (Leclercq et al. 2024) révèle des profils épidémiologiques distincts selon le sexe. Chez les femmes, la distribution présente une caractéristique bimodale avec un premier pic mineur observé vers 25-35 ans, représentant les formes materno-néonatales (8% des cas 30 à 50 cas par an) et un pic majeur situé entre 75 et 85 ans. La distribution masculine des cas de listériose est autour de 75-80 ans. La majorité des cas masculins concerne des hommes âgés de plus de 65 ans, le nombre de cas augmentant de manière progressive à partir de 50 ans pour atteindre

son maximum dans la huitième décennie de vie. Les cas restent relativement rares avant l'âge de 40 ans dans cette population.

En Europe, 2952 cas de listériose humaine ont été déclarés en 2023. L'Efsa, en 2018, a estimé à l'aide d'un modèle d'appréciation des risques qu'une faible proportion (3%) de cas de listérioses seraient reliés à la consommation de fromage (les principales sources étant les produits prêts à consommer à base de viande ou de poisson) (EFSA Panel on Biological Hazards et al. 2018). Dans une autre évaluation quantitative des risques utilisant le même modèle que l'Efsa mais en s'attachant aux données de consommation françaises, l'ensemble des fromages (au lait cru ou pasteurisé) représente environ 10% des cas de listériose (Redondo et al. 2025).

D'après le modèle de cette expertise, la population la plus sensible est représentée par les personnes âgées de plus de 65 ans (65% des cas), suivi des personnes immunodéprimées (n'appartenant pas à la classe d'âge des plus de 65 ans) avec 25 à 30% des cas et enfin les femmes (18-44 ans) avec 5 à 10% des cas. Les résultats obtenus sont là encore en concordance avec les données françaises sur les infections à *L. monocytogenes* où environ 70% des cas répertoriés concernaient les personnes de 65 ans et plus (Leclercq et al. 2024). Enfin, d'après le scénario de base, les fromages au lait cru à pâte molle représentent une plus grande proportion des cas annuel de listériose avec 40 cas, contre 10 cas pour les fromages au lait cru à pâte pressée non cuite et affinage court.

5.2.4 Conclusion sur les résultats de la modélisation du risque pour le scénario de base

De façon générale, on peut donc conclure que les sorties du modèle sont en accord avec les données épidémiologiques, ou tout au moins du même ordre de grandeur. Ceci ne permet pas d'affirmer que le modèle est validé au sens mathématique du terme (un autre système d'équations aurait pu conduire aux mêmes chiffres) mais nous permet de l'utiliser à des fins d'évaluation de mesures de maîtrise, raison pour laquelle le modèle a été développé (voir section 4.1).

Les sorties du modèle donnent des estimations du risque et du nombre de cas avec des incertitudes assez larges, les différentes sources de celles-ci étant discutées dans les sections 5.3.1 et 5.3.2. Dans la suite du rapport et en particulier pour l'évaluation des mesures de maîtrise, les résultats seront présentés en les arrondissant à la dizaine près (par ex. réduction de 10 ou de 20 du nombre de cas).

Il y a toutefois un bémol à l'utilisation du modèle. Il porte sur l'effet de l'éviction de consommation pour les enfants de moins de trois ans, le modèle n'étant pas très précis sur cette classe d'âge (probablement en lien avec les données de consommation). L'interprétation de la mesure d'éviction nécessitera donc une attention particulière, car l'effet de l'éviction pourrait être masqué par la sous-estimation du risque pour cette catégorie.

5.3 Analyse d'incertitude pour le scenario de base

5.3.1 Analyse quantitative des incertitudes

Une analyse quantitative de l'incertitude a été conduite sur une série de paramètres du modèle d'exposition¹⁸. Elle vise à identifier l'impact des incertitudes liées aux données d'entrée (permettant de construire les distributions des paramètres du modèle¹⁹) sur la précision de l'estimation du risque, et de ce fait à dresser une liste de données prioritaires à acquérir pour consolider à l'avenir le modèle. Elle ne vise pas à caractériser l'efficacité des mesures de maîtrise, celle-ci étant traitée dans le rapport dans les sections 6 et 7.

Cette analyse d'incertitude a consisté à évaluer l'impact de chaque paramètre en lui attribuant une loi uniforme dans le cadre des simulations de type Monte Carlo. La définition des bornes de ces lois uniformes a été adaptée en fonction des données disponibles, selon quatre cas :

- (i) lorsque les données de prévalence ou de proportion permettaient d'ajuster une loi bêta, les bornes ont été définies à partir de l'intervalle de confiance à 95 % de cette loi ;
- (ii) pour les paramètres issus de modèles statistiques (par exemple des *odds ratios*), les bornes ont été fixées à partir de leur intervalle de confiance à 95 % issu de la publication d'origine ;
- (iii) lorsque plusieurs sources documentaires rapportaient des estimations différentes pour un même paramètre, les valeurs minimale et maximale identifiées dans la littérature retenue ont été utilisées comme bornes de la loi uniforme ;
- (iv) en l'absence de données statistiques précises, une plage de $\pm 20\%$ autour de la valeur centrale a été retenue comme estimation de l'incertitude.

L'ensemble des hypothèses, bornes et références utilisées sont documentées dans les annexes 4 et 5, qui regroupe également les valeurs et les justifications retenues pour chaque paramètre (source de la donnée et élément de traçabilité de la valeur). La section suivante présente l'analyse d'incertitude sur les fromages à PMCF au lait cru de vache. Les analyses d'incertitude sur les autres fromages sont présentées en annexe 5.

¹⁸ Le choix des paramètres sur lesquels l'incertitude a été intégrée relève des choix du GT.

¹⁹ Une analyse d'incertitude ne reprend pas l'impact de la variabilité associée à certains paramètres (par exemple le temps de latence de *L. monocytogenes* pendant l'affinage qui a été considéré variable mais défini de façon précise (sans incertitude))

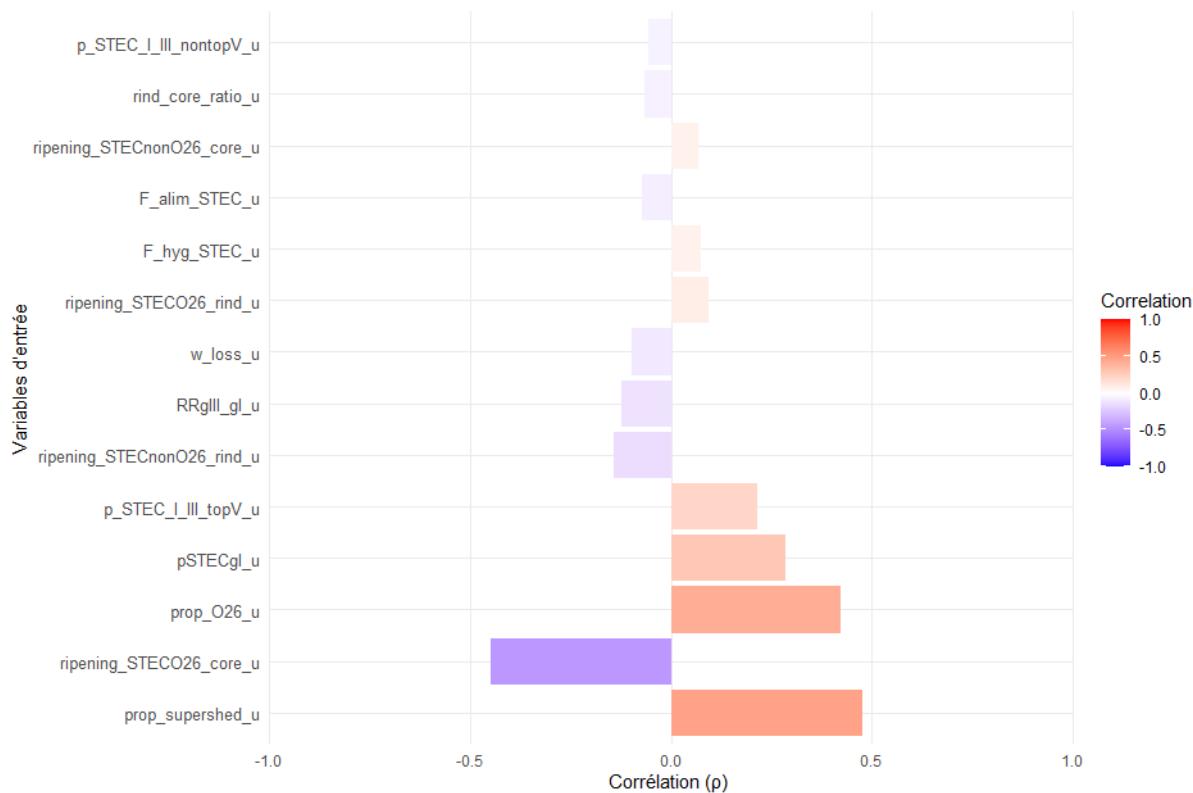


Figure 26 Influence de l'incertitude des paramètres d'entrée sur l'estimation des infections à STEC (résultats pour 100 itérations).

Légende des variables d'entrée, de bas en haut : proportion d'animaux super-excréteurs de STEC dans les matières fécales (prop_supershed_u) ; paramètre d'inactivation pendant l'affinage des STEC O26 à cœur (ripening_STECO26_core_u) ; proportion de sérotypes O26 chez les animaux (prop_O26_u) ; proportion de souches de STEC du groupe I parmi les animaux porteurs (pSTECgI_u) ; prévalence de portage des animaux pour STEC des groupes I et III du top V (p_STEC_I_III_topV_u) ; effet de l'affinage sur les STEC non O26 dans la croûte (ripening_STECnonO26_rind_u) ; ratio de risque entre les groupes gIII et gI (RRgIII_gI_u) ; fraction de répartition des UFC entre caillé et lactosérum (w_loss_u) ; effet de l'affinage sur STEC non O26 à cœur (ripening_STECnonO26_core_u) ; Ratio de risque de portage lié à la maîtrise de la qualité de l'alimentation dans les fermes (F_alim_STEC_u) ; Ratio de risque de portage lié à la maîtrise d'hygiène dans les fermes (F_hyg_STEC_u) ; effet de l'affinage sur STEC O26 dans la croûte (ripening_STECO26_rind_u) ; ratio cœur/croûte (rind_core_ratio_u) ; prévalence de portage des animaux pour STEC des groupes I et III n'appartenant pas au top V (p_STEC_I_III_nontopV_u).

La Figure 26 illustre l'influence relative des différentes sources d'incertitude des paramètres sur la précision de l'estimation du risque d'infections à STEC en lien avec la consommation de fromage à PMCF. Les résultats montrent que l'incertitude liée à la proportion de super-excréteurs de STEC dans les matières fécales (prop_supershed_u) a l'impact le plus important sur la précision d'estimation du risque. L'incertitude sur l'effet de l'affinage sur l'inactivation de STEC O26:H11 dans le cœur du fromage (ripening_STECO26_core_u) représente la deuxième source d'incertitude la plus influente, suivie par la proportion de sérotype O26:H11 chez les animaux (prop_O26_u), la proportion de souches de STEC du groupe I parmi les animaux porteurs (pSTECgI_u) et la prévalence de portage des animaux pour les STEC des groupes I et III du top V (p_STEC_I_III_topV_u).

L'effet de l'affinage sur l'inactivation de STEC non-O26:H11 dans la croûte (ripening_STECnonO26_rind_u), le ratio de risque entre les groupes gIII et gI (RRgIII_gI_u), la fraction de répartition des UFC entre caillé et lactosérum (w_loss_u) et le paramètre d'inactivation des STEC O26:H11 dans la croûte pendant l'affinage (ripening_STECO26_rind_u) constituent également des sources significatives d'incertitude.

Les incertitudes sur le facteur d'hygiène (F_hyg_STEC_u), le facteur d'alimentation (F_alim_STEC_u), le paramètre d'inactivation des STEC non-O26:H11 dans le cœur

(ripening_STECnonO26_core_u), le ratio croûte/cœur (rind_core_ratio_u) et la prévalence de portage des animaux pour les STEC des groupes I et III n'appartenant pas au top V (p_STEC_I_III_nontopV_u) présentent les influences les plus faibles parmi les paramètres étudiés.

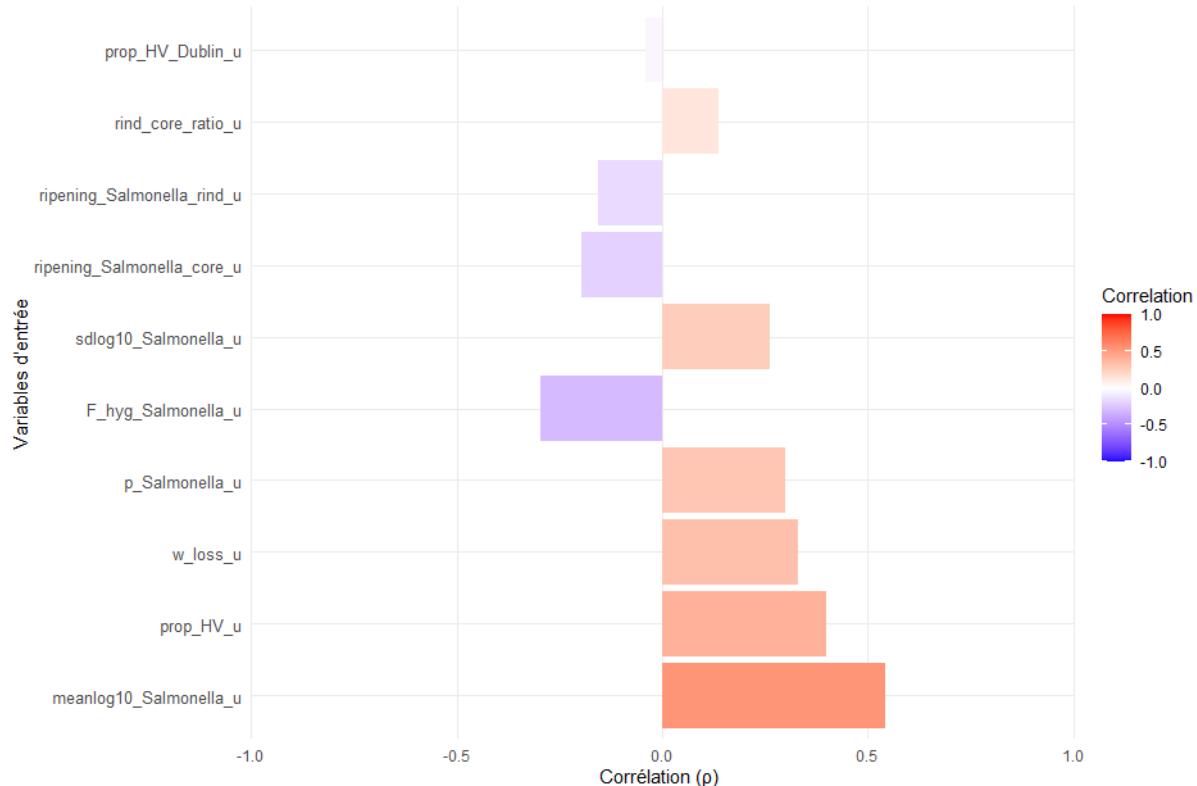


Figure 27 Influence de l'incertitude des paramètres d'entrée sur l'estimation du risque de salmonellose (résultats pour 100 itérations).

Légende des variables d'entrée, de bas en haut : moyenne des concentrations en log10 de Salmonella dans les matières fécales (meanlog10_Salmonella_u) ; proportion de souches appartenant aux souches virulentes (prop_HV_u) ; fraction de répartition des UFC entre caillé et lactosérum (w_loss_u) ; prévalence de portage fécal de Salmonella (p_Salmonella_u) ; facteur de risque de portage lié à la maîtrise de l'hygiène des fermes (F_hyg_Salmonella_u) ; écart-type des concentrations en log10 de Salmonella dans les matières fécales (sdlog10_Salmonella_u) ; effet de l'affinage sur Salmonella dans le cœur (ripening_Salmonella_core_u) ; effet de l'affinage sur Salmonella dans la croûte (ripening_Salmonella_rind_u) ; ratio cœur/croûte (rind_core_ratio_u) ; proportion des souches de type Dublin parmi les souches hautement virulentes (prop_HV_Dublin_u).

La Figure 27 illustre l'influence relative des différentes sources d'incertitude des paramètres sur l'estimation du risque de salmonellose pour la consommation de fromages à PMCF. Les résultats montrent que l'incertitude liée au paramètre caractérisant la concentration initiale de *Salmonella* dans les matières fécales (meanlog10_Salmonella_u) a l'impact le plus fort sur la précision de l'estimation du risque. L'incertitude sur la proportion de souches appartenant aux souches les plus virulentes (dont *S. Dublin*) (prop_HV_u) présente une corrélation positive élevée (supérieure à 0,4). La fraction de répartition entre caillé et lactosérum (w_loss_u) exerce également une influence substantielle sur l'incertitude du risque estimé, tout comme les facteurs liés à l'inactivation pendant l'affinage (ripening_Salmonella_core_u et ripening_Salmonella_rind_u). Enfin l'incertitude sur la prévalence globale de *Salmonella* (p_Salmonella_u) sur le facteur de risque de présence de portage lié à l'hygiène (F_hyg_Salmonella_u) ainsi que sur le ratio croûte/cœur (rind_core_ratio_u) et la proportion de souches de type Dublin (prop_HV_Dublin_u) présentent l'influence la plus faible parmi les paramètres incertains étudiés.

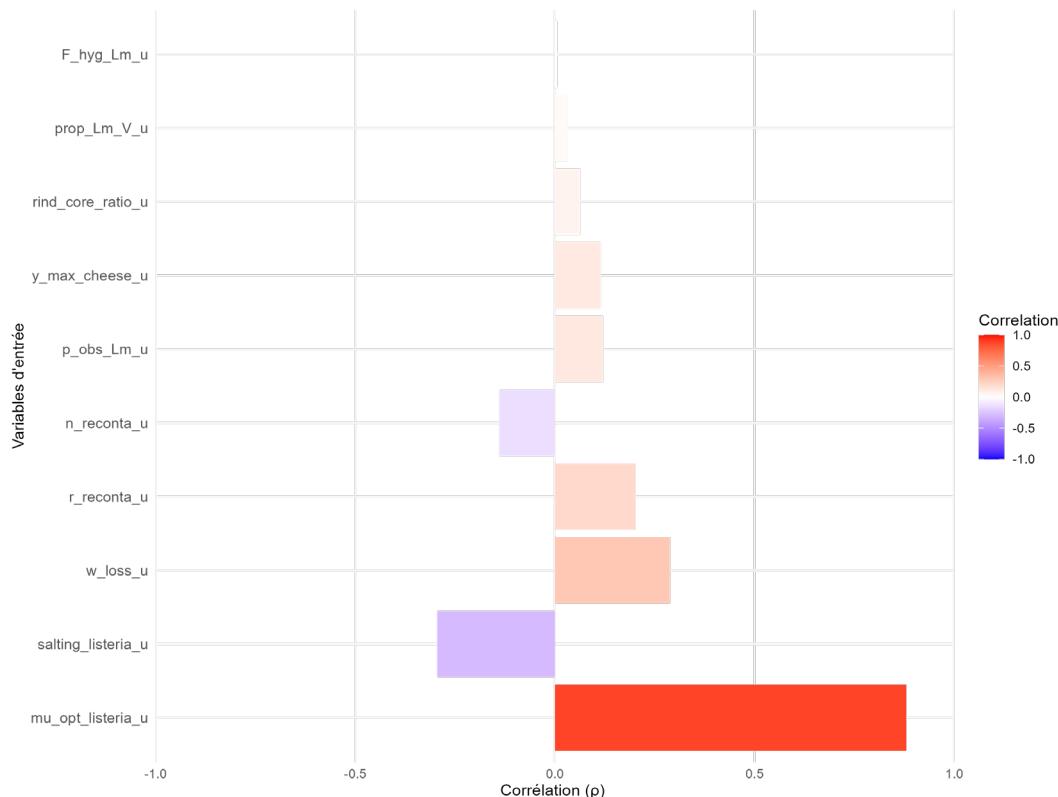


Figure 28 Influence de l'incertitude des paramètres d'entrée sur l'estimation du risque de listérose (résultats pour 100 itérations).

Légende des variables d'entrée, de bas en haut : taux de croissance optimal de *L. monocytogenes* dans les fromages (mu_opt_listeria_u) ; effet du salage (salting_listeria_u) ; fraction de répartition des UFC entre caillé et lactosérum (w_loss_u) ; taux de recontamination au cours de l'affinage (r_reconta_u) ; nombre d'UFC apportées lors de la recontamination (n_reconta_u) ; prévalence de *L. monocytogenes* dans les tanks (p_obs_Lm_u) ; concentration maximale pour la phase stationnaire (y_max_cheese_u) ; ratio croûte/cœur (rind_core_ratio_u) ; proportion de souches virulentes (prop_Lm_V_u) ; facteur de risque de présence lié à l'hygiène (F_hyg_Lm_u)

La Figure 28 illustre l'influence relative des différentes sources d'incertitude des paramètres sur l'estimation du risque de listérose pour les fromages à PMCF. Les résultats montrent que l'incertitude liée au taux de croissance optimal de *L. monocytogenes* dans les fromages (mu_opt_listeria_u) a l'impact le plus important sur la précision d'estimation du risque. L'effet du salage (salting_listeria_u) représente la deuxième source d'incertitude la plus influente, suivie par la fraction de répartition des cellules entre caillé et lactosérum (w_loss_u). Le taux de recontamination au cours de l'affinage (r_reconta_u), le nombre de cellules apportées lors de la recontamination (n_reconta_u), la prévalence de *L. monocytogenes* dans les tanks des fermes (p_obs_Lm_u) et la concentration cellulaire maximale pour la phase stationnaire dans les fromages (y_max_cheese_u) constituent également des sources significatives d'incertitude dans l'estimation du risque. Le ratio croûte/cœur (rind_core_ratio_u) et la proportion de souches les plus virulentes (prop_Lm_V_u) ont une influence plus modérée. Enfin, l'incertitude sur le facteur de risque de présence de *L. monocytogenes* dans les tanks lié à l'hygiène (F_hyg_Lm_u) présente l'influence la plus faible parmi les paramètres étudiés.

En conclusion, cette analyse quantitative permet de hiérarchiser les sources d'incertitude ayant entraîné un manque de précision des estimations des risques. Cette hiérarchisation des sources d'incertitude a permis de lister les données prioritaires à acquérir pour consolider le modèle (cf section 7.1).

5.3.2 Analyse qualitative des incertitudes (ACCMER)

Conformément aux recommandations formulées dans le guide méthodologique du GT ACCMER²⁰ (Anses, 2023), une analyse qualitative des incertitudes a été conduite dans le cadre du développement des modèles AQR appliqués. Cette analyse a été réalisée selon la méthode de référence décrite dans le rapport ACCMER, en mobilisant l'outil recommandé sous forme de tableau structuré. Chaque source d'incertitude identifiée a été décrite en précisant la composante du modèle concernée, l'origine de l'incertitude, ainsi que les éléments de justification disponibles. La démarche a porté sur l'ensemble des étapes de la modélisation, depuis l'identification du danger, la caractérisation des dangers microbiologiques considérés, jusqu'aux hypothèses relatives aux pratiques de production et de transformation des fromages susceptibles de réduire la maîtrise globale de la sécurité du produit.

L'analyse qualitative conduite a ainsi permis d'identifier plusieurs sources d'incertitude susceptibles d'influencer de manière significative les résultats du modèle d'évaluation quantitative du risque.

Au regard du périmètre de l'expertise, défini par la saisine, l'appréciation des risques se limite aux fromages au lait cru. Ce cadrage restreint exclut d'autres véhicules alimentaires tels que les fromages au lait pasteurisé, ainsi que certains produits ou circuits de distribution (par exemple les importations ou les productions par les consommateurs eux-mêmes).

Par ailleurs, l'approche retenue repose sur la sélection de 11 combinaisons danger/fromage/espèce animale, établie selon les critères définis précédemment par le groupe de travail FALC (Anses, 2022). Bien que cette sélection soit argumentée et cohérente avec les objectifs de l'expertise, elle est susceptible d'occulter certaines situations à risque, non incluses dans le champ d'analyse (par exemple la présence d'autres dangers comme les entérotoxines de *S. aureus*, TBEV, *Mycobacterium* ou *Brucella*).

En complément, les fromages au lait cru ont été regroupés en grandes catégories technologiques (PMCF, PMCL et PPNCC) afin de structurer l'analyse et de limiter le nombre de modèles. Ce choix, s'il est pertinent à l'échelle de l'expertise au niveau national, masque toutefois la diversité des produits au sein de chaque catégorie, tant en termes de pratiques de fabrication (acidification, remontée de pH, durée d'affinage) que d'hétérogénéité entre ateliers de transformation ou ateliers de production fermiers. Une variabilité intra-catégorie a été intégrée pour certains paramètres technologiques, sans assurance qu'elle rende compte de l'ensemble des pratiques existantes.

D'un point de vue méthodologique, la modélisation tient compte de certaines incertitudes de manière quantitative (cf. section précédente). Toutefois, les paramètres utilisés reposent sur des données hétérogènes, parfois anciennes ou peu représentatives (par exemple au regard des pratiques suivies en France). Cela concerne notamment la prévalence des dangers, les niveaux de contamination initiale, ou encore les dynamiques de croissance des agents pathogènes pendant l'affinage. En complément, l'efficacité réelle des mesures de maîtrise, en particulier dans les circuits fermiers, reste mal documentée, ce qui limite la précision des estimations.

²⁰ ACCMER : Accompagnement des recommandations du GT MER (Méthodologie de l'évaluation des risques)

Les modèles développés dans cette expertise intègrent pour la première fois un module « ferme » détaillé, modélisant les principales voies d'introduction des trois dangers identifiés. Ces voies ont été identifiées comme prioritaires par le groupe de travail, tandis que d'autres, jugées marginales (par exemple les mammites à *Salmonella*), ont été exclues. Certaines simplifications ont également été faites, notamment en ce qui concerne les pratiques d'hygiène en élevage (référencées globalement comme « hygiène des locaux » ou « hygiène de la traite »). Or, il existe vraisemblablement une plus grande diversité de pratiques et de facteurs de risque spécifiques à chaque système de production.

Une incertitude particulièrement importante réside par ailleurs dans l'extrapolation de données d'une espèce animale à une autre : en l'absence de données spécifiques pour les ovins et caprins, certaines valeurs issues de la filière bovine ont été utilisées telles quelles pour les deux autres espèces (par exemple les *odds ratios* pour le portage chez les animaux, le taux de croissance optimum dans les fromages, etc.). D'autres incertitudes importantes portent sur la consommation, notamment chez les populations vulnérables. Les pratiques susceptibles de moduler l'exposition du consommateur aux dangers (durée et température d'affinage, consommation partielle ou différée du produit, etc.) ne sont pas toujours finement intégrées dans le modèle. En outre, la caractérisation du risque ne distingue pas les consommateurs réguliers des occasionnels, ni les différents comportements alimentaires au sein du foyer.

Par ailleurs, les variations saisonnières, tant au niveau de la production (ex. : fluctuations de la contamination ou des conditions d'élevage selon la saison) que des comportements de consommation (quantité et types de fromages consommés selon les périodes de l'année), n'ont pas été intégrées, alors qu'elles pourraient influencer l'exposition aux dangers. Ces variations, souvent difficiles à caractériser finement, constituent une source d'incertitude supplémentaire.

Les relations dose-réponse issues de la littérature n'intégraient pas d'incertitude. Les modèles dose-réponse dans ce rapport, issus de la littérature, sont imparfaits et donc source d'incertitude : i) le modèle dose-réponse pour les STEC ne prend pas en compte la régulation de l'induction du prophage par l'environnement chez les souches lysogènes et son impact sur la toxinogénèse ; ni la présence de phages libres (et éventuellement un effet seuil) ; ii) contrairement à *L. monocytogenes* (dont la relation dose-réponse a été calibré sur les données épidémiologiques) les modèles dose-réponse pour les STEC et *Salmonella* ne prennent pas suffisamment en compte les facteurs de l'hôte et de son microbiote.

L'ensemble des incertitudes qualitatives identifiées, ainsi que leur analyse, sont synthétisées dans le tableau en annexe 5.

L'ensemble de ces incertitudes est susceptible d'entraîner, selon les cas, une sous- ou une sur-estimation du risque. Cela souligne la nécessité d'une lecture prudente des résultats produits par les modèles.

6 Efficacité des mesures de maîtrise et de surveillance

Afin d'évaluer les effets potentiels des différentes interventions, le GT a estimé par simulation de Monte Carlo l'impact de l'ensemble des mesures de maîtrise et de surveillance identifiées dans la partie 3. Ces mesures couvrent la ferme, la fabrication et le consommateur. Le modèle tient compte du fait que certaines mesures de maîtrise et de surveillance identifiées dans la partie 3 sont déjà mises en œuvre par la plupart des éleveurs, des transformateurs et des consommateurs (« scénario de base »). L'évaluation a été menée pour chaque combinaison danger/fromage/espèce animale en s'appuyant sur les modèles d'AQR développés à cet effet. Les simulations ont été réalisées indépendamment pour chaque mesure afin d'apprécier son effet propre sur la réduction du risque (exprimé en nombre de cas, en nombre de cas graves et en nombre de décès). Les résultats complets de ces simulations sont présentés en annexe 6 sous forme d'une feuille Excel qui permet de trier l'effet des mesures selon l'agent pathogène, le type de production, le scénario (scénario de base, mesure de maîtrise, surveillance) et le type de fromage/espèce animale.

La section 6.1 illustre une utilisation de cet ensemble de résultats. Elle présente l'effet de l'ensemble des mesures de maîtrise et de surveillance à chaque stade de la chaîne, en se concentrant sur les PMCFb. Ce type de produit constitue un cas d'étude représentatif, en raison de sa forte implication dans les expositions aux trois microorganismes pathogènes sélectionnés.

La section 6.2 propose une synthèse globale des résultats obtenus afin d'identifier les principaux leviers pour chaque microorganisme pathogène. Le GT a distingué l'étude des effets cumulés des mesures selon les stades (6.2.1) de l'effet des mesures les plus efficaces pour chaque combinaison danger/fromage/espèce animale (microorganisme pathogène - type de fromage) (6.2.2). Une dernière sous-section (6.2.3), présente les effets combinés des interventions efficaces lorsque plusieurs mesures sont appliquées simultanément.

6.1 Illustration de l'effet des mesures de maîtrise pour les PMCFb

Les résultats sont exprimés en termes de risque médian par portion ainsi qu'en nombre de cas annuels, en nombre de cas graves annuels, et en nombre de décès annuels estimés (Annexe 6). Les résultats sont présentés sous forme de médianes avec leurs intervalles de confiance à 95 %, ce qui permet d'apprécier l'incertitude (cf partie 5.3) associée à l'estimation de l'impact des différentes mesures de maîtrise. À noter que dans ce type d'approche, la précision de l'estimation dépend du nombre d'itérations réalisées²¹ (80 dans le domaine d'incertitude et 1 800 dans le domaine de la variabilité). Dans le cas présent, ce nombre permet d'atteindre une précision relative de l'ordre de 15 % sur la valeur médiane pour *Salmonella* et *L. monocytogenes* et de 5 % pour les STEC. Afin d'illustrer l'efficacité des mesures de maîtrise obtenue pour les différents modules (ferme, fabrication, consommation), le GT retient le nombre médian de cas graves associés à chaque microorganisme pathogène comme indicateur.

²¹ Le nombre d'itérations a été limité par la durée des simulations

6.1.1 Mesures de maîtrise au niveau de la ferme

Dans les élevages, l'efficacité des mesures de maîtrise varie en fonction du danger ciblé et du type de mesure mise en œuvre. Le Tableau 10 synthétise l'effet de ces différentes mesures de maîtrise et de surveillance sur la réduction attendue du nombre de cas graves.

Tableau 10 : Effet des différentes mesures de maîtrise et de surveillance au stade de la ferme sur la variation du nombre de cas graves associés à la consommation de fromages PMCF au lait cru de bovin

Mesures de maîtrise et de surveillance		STEC (95*)	Salmonella (384*)	<i>L. monocytogenes</i> (17*)
Mesures de maîtrise	Hygiène générale (limiter le transfert de matière fécale)	-19	-50	-**
	Amélioration de la qualité de l'alimentation	-52	-	-5
	Gestion des troupeaux obtention de troupeaux indemnes de STEC O26:H11 ou <i>Salmonella Dublin</i>)	-93	-66	-
	Conception hygiénique des équipements	-	-	-1
	Détection systématique des mammites sub-cliniques dues à <i>L. monocytogenes</i>	-	-	0
Surveillance	Recherche au niveau du filtre n = 1 en cas de dépassement du critère <i>E. coli</i> ; si résultat positif, exclusion pendant 10 jours	-33	0	-3
	Recherche trimestrielle sur filtre	0	0	0

* Nombre de cas graves pour le scénario de base ; ** Non applicable au regard des mesures de maîtrise considérées

La première mesure de maîtrise envisagée concerne l'amélioration de l'hygiène générale dans les élevages. Cette amélioration se traduit par une réduction de la quantité de matière fécale transférée lors de la traite, ainsi que par le passage de l'ensemble des fermes à un niveau d'hygiène qualifié de « satisfaisant ». Pour les STEC, *Salmonella* et *L. monocytogenes*, le modèle estime à 95, 384 et 17, respectivement, les nombres annuels de cas graves pour les pratiques actuelles. Pour les STEC, la mise en œuvre de cette première mesure permettrait de réduire ce nombre de 19 cas graves par an. Pour *Salmonella*, la mise en œuvre de cette mesure de maîtrise permettrait d'éviter 50 cas graves. Ces diminutions des nombres de cas pour les STEC et *Salmonella* s'expliquent par la réduction du transfert de contamination fécale vers le lait lors de la traite, ce qui diminue la contamination initiale des laits de tank.

L'amélioration de la qualité de l'alimentation, notamment par une meilleure maîtrise des conditions d'ensilage et d'enrubannage dans toutes les fermes, permettrait d'éviter 52 cas graves liés aux STEC et 5 cas liés à *L. monocytogenes*. L'amélioration de la qualité de l'alimentation des animaux n'a pas été considérée comme une mesure de maîtrise pertinente pour limiter le danger *Salmonella* (partie 3.1.2).

La mesure de maîtrise limitant l'introduction de nouveaux animaux porteurs de STEC appartenant au sérotype O26:H11 et visant à obtenir des troupeaux indemnes de STEC O26:H11 du groupe I (*stx2a+* et/ou *stx2d*) permettrait d'éviter 93 cas graves. Ce résultat s'explique par la construction du modèle et par la proportion importante de souches STEC O26:H11 (Delannoy et al. 2022) au sein des élevages bovins. De la même manière, la mesure

de maîtrise permettant d'obtenir des troupeaux indemnes de *S. Dublin* permettrait une réduction de 66 cas graves. Ces mesures de maîtrise sont en lien direct avec la mise en place de programmes de surveillance des élevages à partir des filtres à lait des tanks permettant de définir le statut indemne pour ce type de souches (cf partie 4.2.1.1).

L'amélioration de la conception hygiénique des équipements de traite dans toutes les fermes présente un effet spécifique sur *L. monocytogenes* et diminue d'un seul cas le nombre de cas graves annuels. Cette diminution n'est pas significative car elle est du même ordre que la marge d'erreur de simulation.

Concernant la détection systématique des mammites subcliniques à *L. monocytogenes*, visant à réduire une contamination directe du lait due à l'infection des mamelles, cette mesure ne permettrait pas de réduire significativement les cas graves.

Enfin, en ce qui concerne les programmes de surveillance des filtres à lait de tank à la ferme vis à vis des STEC, *Salmonella* et *L. monocytogenes* (recherche du microorganisme pathogène, n = 1, en cas de dépassement du critère d'hygiène *E. coli*) : ils permettraient d'éviter, respectivement, 33 et 3 cas graves pour les STEC et *L. monocytogenes*, mais n'auraient pas d'effet sur *Salmonella*.

6.1.2 Mesures de maîtrise et de surveillance au stade de la fabrication

Le Tableau 11 synthétise l'effet des différentes mesures de maîtrise et de surveillance au stade de la fabrication sur la réduction attendue du nombre de cas graves.

Tableau 11 : Effet des différentes mesures de maîtrise et de surveillance au stade de la fabrication sur la modification du nombre de cas graves associés à la consommation de fromages à PMCF au lait cru de bovin

Mesures de maîtrise et de surveillance		STEC (95*)	Salmonella (384*)	<i>L. monocytogenes</i> (17*)
Mesures de maîtrise	Maîtrise du profil global d'acidification	-58	-317	0
	Augmentation de la durée d'affinage (7 jours)	-37	-293	+34
	Utilisation de ferments producteurs de molécules inhibitrices	-	-	-17
	Renforcement de l'hygiène (recontamination)	-	-	-4
Surveillance	Lait : abaissement du seuil <i>E. coli</i> à 10 ufc/mL (industrie)	-48	-63	-7
	Recherche spécifique lait, tous les lots, n = 1	-4	-10	0
	Recherche spécifique filtre, tous les lots, n = 1	-6	-25	0
	Recherche au pic de contamination, tous les lots, n=5	-48	-93	-6

* Nombre de cas graves pour le scénario de base

La mise en œuvre systématique, lors de la fabrication, de profils d'acidification rapide permettrait d'éviter annuellement 49 cas graves de STEC, 317 cas graves de salmonellose et

aucun cas grave de listériose. Cette mesure, mise en place, *via* un choix de souches de bactéries lactiques présentant des profils d'acidification les plus rapides possibles au sein de la gamme permise pour une technologie fromagère donnée et un suivi de pH, agit en créant des conditions physico-chimiques défavorables à la croissance des microorganismes pathogènes. Cette mesure n'est importante que pour les premières étapes de la fabrication (coagulation à l'égouttage), les étapes de fabrication suivantes ne permettant pas la croissance de STEC et de *Salmonella*.

L'augmentation de la durée d'affinage de 7 jours présente des effets contrastés selon les microorganismes pathogènes. Cette mesure permettrait de réduire le nombre médian de cas graves annuels de 37 cas pour les STEC et de 293 cas pour *Salmonella*, *via* une inactivation prolongée de ces agents pathogènes. En revanche, pour *L. monocytogenes*, cette mesure entraîne une augmentation du nombre médian de cas graves annuels (+ 34 cas) en raison de la capacité de croissance de ce microorganisme pathogène pendant l'affinage. Cet effet antagoniste selon le microorganisme pathogène ne permet donc pas d'envisager cette mesure de maîtrise pour limiter les risques sanitaires liés à la consommation de fromages au lait cru.

L'utilisation de ferments producteurs de molécules inhibitrices, mesure spécifique à *L. monocytogenes*, permettrait de réduire le nombre médian de cas graves annuels de 17 cas.

Le renforcement de l'hygiène des locaux de production, en particulier durant la phase d'affinage, vise à limiter les recontaminations par *L. monocytogenes* issues de l'environnement de production, distinctes des contaminations provenant du lait cru. Cette mesure, qui cible spécifiquement les contaminations post-fabrication, permettrait une réduction du nombre médian de cas graves annuels de 4 cas.

L'intensification de la surveillance microbiologique en cours de fabrication a également été testée pour les 3 microorganismes pathogènes. Plusieurs programmes de surveillance ont été testés. Concernant, le critère d'hygiène *E. coli* sur les laits à réception (analyse tous les jours, 100 % des lots n = 1) permettant l'exclusion du lait de tank en cas de dépassement, une diminution du seuil de 50 ufc/mL (scénario de base) à 10 ufc/mL permettrait de réduire le nombre de cas graves annuels de 48, 63 et 7 cas, respectivement, pour les STEC, *Salmonella* et *L. monocytogenes*. Pour la recherche systématique (100 % des lots et 100 % des entreprises) des différents microorganismes pathogènes dans les laits mis en production (n = 1), la réduction du nombre de cas graves est estimée à 4 et 10 cas pour, respectivement, les STEC et *Salmonella* ; aucun impact n'est observé pour *L. monocytogenes*. L'analyse systématique des différents microorganismes pathogènes sur les filtres à lait permettrait une réduction de 6 cas graves associés aux STEC, 25 cas graves de salmonellose mais aucun cas de listériose. La mise en place systématique d'une surveillance des différents microorganismes pathogènes sur le fromage (n = 5) au pic de la contamination (en fin d'égouttage pour les STEC et *Salmonella*, et en fin d'affinage pour *L. monocytogenes*) permettrait de réduire le nombre médian de cas graves de 4 cas pour les STEC, de 10 cas pour *Salmonella* et de 0 cas pour *L. monocytogenes*. Enfin la même mesure de maîtrise appliquée avec n = 5 permettrait d'éviter 48 cas graves liés à la présence de STEC, 93 cas graves de salmonellose et 6 cas graves de listériose.

6.1.3 Mesures de maîtrise au niveau du consommateur

Chez le consommateur, l'efficacité des mesures de maîtrise varie également en fonction du danger ciblé et du type de mesure mise en œuvre.

Le Tableau 12 synthétise l'effet de ces différentes mesures de maîtrise au stade du consommateur sur la réduction attendue du nombre de cas graves.

Tableau 12 : Effet des différentes mesures de maîtrise au stade de la consommation sur la modification du nombre de cas graves associés à la consommation de fromages à PMCF au lait cru de bovin

Mesures de maîtrise	STEC (95*)	Salmonella (384*)	<i>L. monocytogenes</i> (17*)
Température des réfrigérateurs $\leq 4^{\circ}\text{C}$	-	-	-17
Température des réfrigérateurs $\leq 8^{\circ}\text{C}$	-	-	-17
Définition d'une DLC à 28 jours et respect de cette DLC	+16	+114	-17
Evictions de consommation :			
< 3 ans	-18	-	-
< 5 ans	-41	-	-
< 10 ans	-69	-	-
> 65 ans	-	-15	-11
Femmes enceintes	-	-	-1
Personnes immunodéprimées	-	-	-8
Non-consommation de la croûte	-83	-57	-10

Le maintien de la température en dessous de 8°C au niveau des réfrigérateurs domestiques permettrait d'éviter 17 cas graves annuels de listériose, sans effet notable sur les autres bactéries pathogènes qui sont en phase de décroissance pendant la conservation, indépendamment de la température. La limitation de la durée de conservation à 28 jours maximum (définition d'une DLC et respect de cette DLC) permettrait une réduction de 17 cas graves de listériose, mais conduirait à une augmentation du nombre de cas graves liés aux STEC (+16) ou à *Salmonella* (+114). Cela s'explique par la différence de comportement de ces bactéries pathogènes pendant la conservation, avec une croissance pour *L. monocytogenes* et une inactivation pour les deux autres agents pathogènes. En d'autres termes, en définissant une DLC à 28 jours, l'exposition des consommateurs diminue pour *L. monocytogenes* et augmente pour les STEC et *Salmonella*.

Les mesures d'éviction ciblant les populations sensibles présentent des efficacités variables en fonction du groupe concerné et de l'âge limite considéré. L'éviction de consommation pour les enfants de moins de 3, 5 et 10 ans (mesures spécifiques aux STEC) permettrait d'éviter, respectivement, 18, 41 et 69 cas graves associés aux STEC. Pour rappel, l'effet de l'éviction pour la catégorie des moins de 3 ans est probablement sous-estimé par manque de données de consommation spécifiques de cette catégorie d'âge (cf. partie 5.2). L'éviction de consommation pour les personnes de plus de 65 ans et immunodéprimées n'a pas d'effet significatif sur le nombre de cas graves de salmonellose. Ce résultat était attendu car dans la construction du modèle, la sensibilité des consommateurs n'intervient pas dans la probabilité de déclencher un cas grave mais uniquement dans la létalité. Concernant *L. monocytogenes*, trois évictions de consommation ont été testées pour trois catégories de personnes : les

personnes de plus de 65 ans, les femmes enceintes et les personnes immunodéprimées ; elles permettraient d'éviter respectivement 11, 1 et 8 cas graves.

Enfin, la non-consommation de la croûte des fromages à PMCF au lait cru de bovin contribue à une réduction du nombre médian de cas graves annuels estimée à 83 cas pour les infections liées aux STEC, à 57 cas pour celles liées à *Salmonella* et à 10 cas pour celles liées à *L. monocytogenes*. Ceci s'explique pour les STEC et *Salmonella* par une efficacité d'inactivation moins importante dans la croûte que dans le cœur, et pour *L. monocytogenes* par une présence initiale plus importante et une croissance plus élevée dans la croûte, en raison des conditions physicochimiques plus favorables.

6.2 Effet des mesures les plus efficaces sur le risque

Cette section évalue l'effet des mesures les plus efficaces par module (ferme, fabrication, consommation), puis par agent pathogène et type de fromage. Les sections 6.2.1 à 6.2.3 portent sur les fabrications industrielles. La section 6.2.1 présente l'effet global par module et une synthèse portant sur tous les fromages. La section 6.2.2 détaille l'effet individuel des mesures les plus performantes selon l'agent pathogène et le type de fromage. La partie 6.2.3 illustre, sur le cas des PMCFb, l'effet combiné de paires de mesures.

Il est important de rappeler que les mesures relevant du module ferme ou du module fabrication sont des mesures qui viennent renforcer ou compléter les mesures déjà mises en place par les opérateurs (voir scénario de base), mesures qui en tant que telles ont déjà une efficacité avérée. En ce qui concerne la contribution du consommateur à la réduction du risque, certaines mesures sont déjà en partie respectées par les consommateurs. Les scénarios testent leur application par la totalité des populations concernées. Cependant, ces recommandations au consommateur ne doivent pas être considérées comme la seule barrière assurant sa protection. Elles ne se substituent pas aux obligations des opérateurs, premiers responsables de la sécurité sanitaire des aliments selon le règlement (CE) n°178/2002 et l'article L. 412-1 du Code de la consommation.

Pour les productions fermières, deux mesures supplémentaires ont été simulées dans le cadre de ce travail (cf. section 3). Leurs résultats sont présentés séparément dans la section 6.2.4.

6.2.1 Impact global des mesures par module (tous les agents pathogènes et tous les fromages)

Comme expliqué précédemment, afin d'évaluer l'impact de combinaisons de mesures de maîtrise et de surveillance, le GT a testé leur application module par module, en considérant successivement les interventions possibles à la ferme, lors de la fabrication, et chez le consommateur. Pour chaque combinaison danger/fromage/espèce animale, le GT a retenu comme indicateur principal le nombre médian de cas graves annuels, en cohérence avec les analyses détaillées dans la partie 6.1. En complément, une synthèse portant sur tous les fromages a été produite, permettant d'apprécier la composition du risque global selon les types de fromages.

La Figure 29 présente les résultats des différentes mesures pour les STEC. Les résultats montrent que les trois niveaux d'intervention - à la ferme, lors de la fabrication, et au moment de la consommation - permettent une réduction significative du risque.

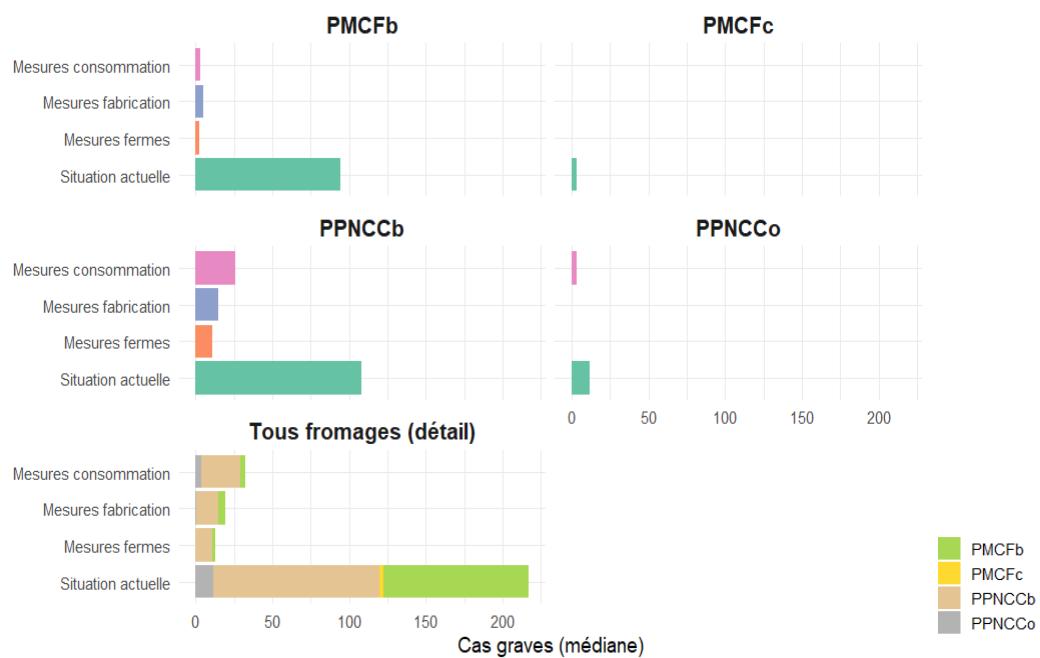


Figure 29. Nombres de cas graves d'infection à STEC prédis par les modèles d'AQR, pour la situation actuelle et pour la situation où l'ensemble des mesures de maîtrise et de surveillance seraient appliquées à chacun des trois stades (à la ferme, à la fabrication, chez le consommateur).

Dans le cas de *Salmonella* (Figure 30), les mesures au stade de la fabrication (mesures de maîtrise et surveillance) sont les plus efficaces, et ce, quel que soit le type de fromage. Les mesures mises en place à la ferme présentent une efficacité variable : elles sont plus marquées pour les fromages à PPNCCb en raison d'une prévalence plus élevée de *Salmonella Dublin* dans les exploitations produisant ces fromages. En revanche, l'effet des mesures appliquées par les consommateurs apparaît limité, notamment parce que celles-ci se limitent essentiellement à la non-consommation de la croûte des fromages (dans le modèle, l'éviction pour les personnes de plus de 65 ans se traduit par un impact sur le nombre de décès, les cas graves étant jugés indépendant des catégories de population).

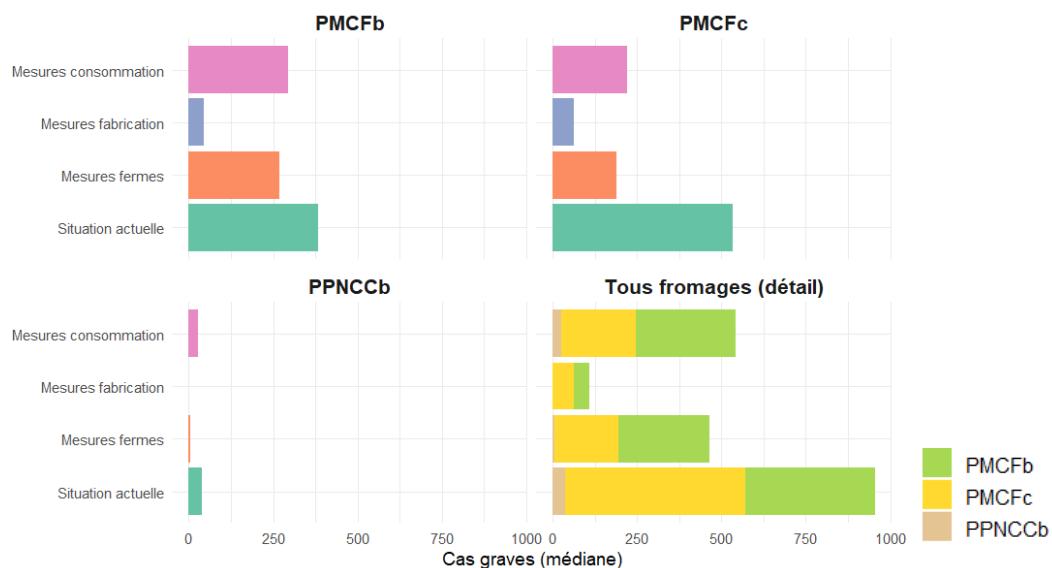


Figure 30 Nombres de cas graves de salmonellose prédis par les modèles d'AQR, pour la situation actuelle et pour la situation où l'ensemble des mesures de maîtrise et de surveillance seraient appliquées à chacun des trois stades.

Pour *L. monocytogenes* (Figure 31), le modèle montre que, dans les configurations où les recommandations sont strictement appliquées au stade de la consommation — notamment l'éviction de consommation pour les populations sensibles et la maîtrise de la température de réfrigération — le risque peut devenir extrêmement faible, sous réserve de l'adhésion complète des consommateurs. Les mesures mises en œuvre au stade de la fabrication peuvent également entraîner une réduction importante du niveau de risque. En revanche, les mesures appliquées à la ferme ont un impact plus limité sur le risque estimé.

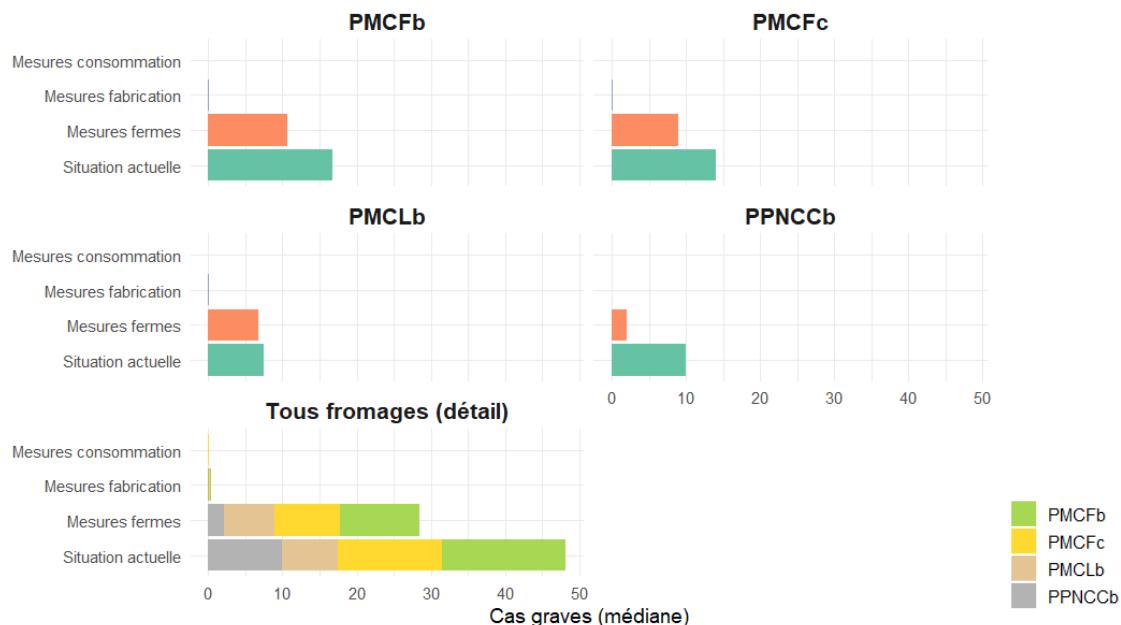


Figure 31 Nombres de cas graves de listériose prédis par les modèles AQR, pour la situation actuelle et pour la situation où l'ensemble des mesures de maîtrise et de surveillance seraient appliquées à chacun des trois stades.

6.2.2 Effet, par microorganisme pathogène et par type de fromage, des mesures individuelles les plus efficaces

Les figures ci-dessous présentent l'effet de mesures prises individuellement parmi l'ensemble des interventions testées dans le modèle. L'analyse porte uniquement sur les mesures jugées les plus efficaces pour réduire le nombre de cas graves.

6.2.2.1 Effet des mesures les plus efficaces pour les STEC

La figure ci-après (figure 32) illustre l'impact des mesures les plus efficaces sur les quatre types de fromages concernés par les cas graves liés aux STEC. Les mesures sélectionnées sont :

- l'éviction des troupeaux porteurs de STEC du groupe I et sérotype O26:H11 ;
- l'acidification rapide du lait ;
- l'éviction de la consommation pour les enfants de moins de 10 ans ;
- l'exclusion du lait de tank contenant plus de 10 ufc/mL pour *E. coli* ;
- l'analyse systématique des lots de fromages ? (n = 5).

Chaque axe du graphique radar présenté sur la figure 32 correspond à un type de fromage. Les différentes courbes représentent les scénarios pour une mesure de maîtrise donnée comparés à la situation actuelle.

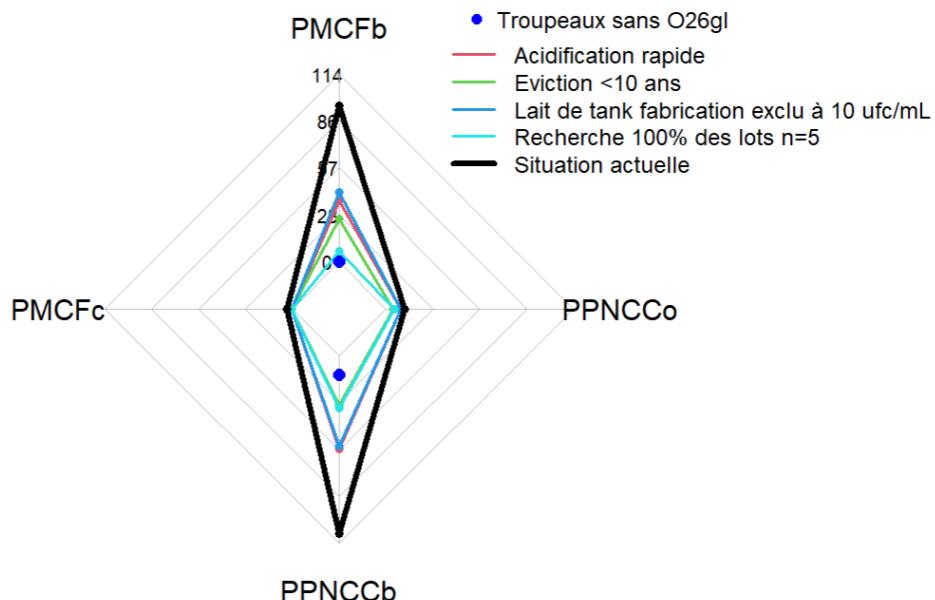


Figure 32 Nombres de cas graves liés aux STEC estimés selon différents scénarios d'intervention, pour quatre types de fromage. Les points reliés correspondent aux mesures qui s'appliquent à l'ensemble des fromages et les points non reliés à celles appliquées à seulement certains d'entre eux.

La recherche systématique ($n = 5$) sur 100 % des lots apparaît comme la mesure la plus efficace. Elle permettrait de réduire fortement le nombre de cas graves, avec des estimations passant de 95 à 6 cas pour les PMCFb, de 3 à 0 cas pour les PMFc, de 108 à 32 cas pour les PPNCCb et de 12 à 5 cas pour les PPNCCo.

Parmi les mesures évaluées, l'éviction des troupeaux porteurs de STEC du sérotype O26:H11 (groupe I) montre des effets marqués, avec une réduction du nombre de cas graves qui serait de 98 % pour les PMCFb (passant de 95 à 2 cas) et de 93 % pour les PPNCCb (passant de 108 à 8 cas). À noter que cette mesure se concentre uniquement sur les élevages bovins (cf. partie 3 du rapport).

L'éviction de la consommation chez les enfants de moins de 10 ans réduirait également fortement l'incidence estimée (de l'ordre de 75%). Les autres interventions conduisent également à des réductions substantielles du risque pour l'ensemble des fromages. L'acidification rapide permettrait ainsi de diviser environ par deux le nombre de cas. Et l'exclusion de la filière lait cru des lots présentant des concentrations en indicateurs *E. coli* >10 ufc/mL permettrait l'obtention d'une réduction similaire.

6.2.2.2 Effet des mesures les plus efficaces pour *Salmonella*

La figure 33 illustre les effets de plusieurs mesures individuelles visant à réduire les cas graves de salmonellose liés à trois types de fromage. Les mesures sélectionnées sont :

- l'éviction des troupeaux porteurs de *Salmonella* Dublin ;
- l'acidification rapide du lait ;
- la recherche de *Salmonella* dans le lait avant transformation ;
- l'analyse systématique des lots ($n = 5$).

La mesure « éviction des troupeaux porteurs de *S. Dublin* » entraîne une réduction importante du nombre de cas, particulièrement pour les PPNCCb, où les cas chutent de 38 à 3. Pour les

PMCFb, une baisse plus modérée est observée, de 384 à 318 cas. Cette différence s'explique par la plus grande prévalence de portage de *S. Dublin* dans les élevages bovins produisant les PPNCC.

Les mesures de maîtrise en lien avec la fabrication montrent également un effet important. L'acidification rapide permettrait une réduction notable : le nombre de cas chute à 72 pour les PMCFb et à 12 pour les PPNCCb. À noter que l'affinage prolongé produit un effet similaire, avec 91 cas pour les PMCFb et 11 cas pour les PPNCCb. Cependant, cette dernière mesure n'est pas retenue par le GT (et donc non représentée sur le graphe) car son application produit un effet inverse sur le risque de listériose.

Les stratégies de recherche de *Salmonella* dans le lait ou les fromages au pic de contamination (post-salage) apparaissent efficaces. La réduction du risque est cependant plus faible que pour les autres mesures.

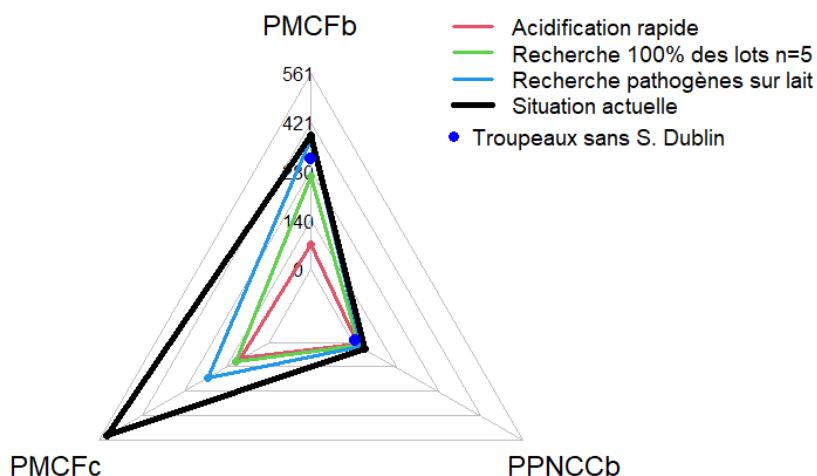


Figure 33. Nombres de cas graves de salmonellose estimés selon différents scénarios d'intervention, pour trois types de fromage. Échelle logarithmique. Les points reliés correspondent aux mesures qui s'appliquent à l'ensemble des fromages et les points non reliés à celles appliquées à seulement certains d'entre eux.

6.2.2.3 Effet des mesures les plus efficaces pour *L. monocytogenes*

La figure 34 présente l'effet des mesures les plus efficaces pour réduire le nombre de cas graves de listériose selon le type de fromage. Les mesures sélectionnées sont :

- l'utilisation d'une ou plusieurs souche(s) productrice(s) de molécules inhibitrices ; la maîtrise de la température de réfrigération à domicile (maintien d'une température inférieure à 4 °C ou inférieure à 8 °C) ;
- l'éviction de consommation pour les personnes âgées de plus de 65 ans ;
- la non-consommation de la croûte.

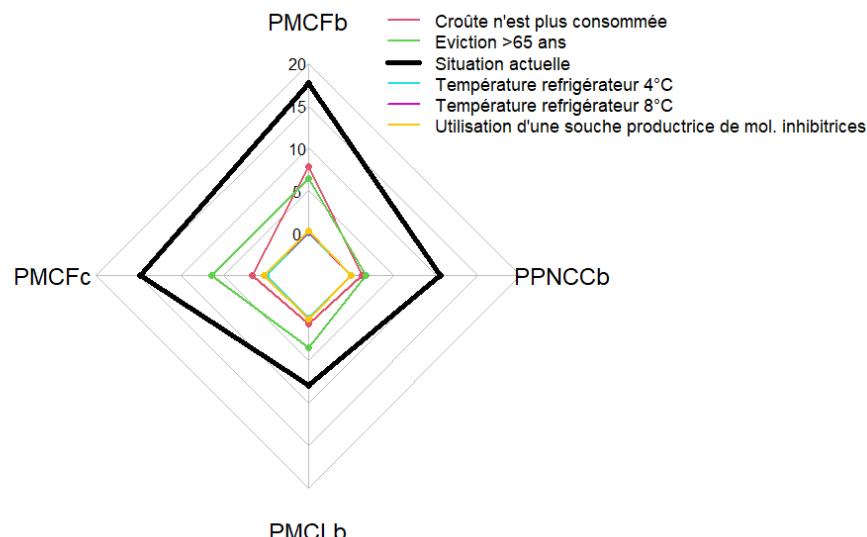


Figure 34 Nombres de cas graves de listérioses estimés selon différents scénarios d'intervention, pour quatre types de fromage (les résultats des mesures « maintien des températures des réfrigérateurs inférieures à 4 °C, à 8 °C et souche productrice de molécules inhibitrices sont confondus sur le graphique, elles sont au niveau du zéro)

Dans la situation actuelle, les cas graves de listérose sont principalement observés avec les fromages à PMCF, avec 17 cas pour les PMCFb et 14 cas pour les PMCFc. Les nombres de cas graves liés aux fromages à PMCLb et à PPNCCb sont respectivement de 7 et 10.

Trois mesures sont très efficaces (Figure 33, ces trois mesures sont indistinguables sur le graphique). Il s'agit d'une part de l'utilisation d'une ou plusieurs souche(s) productrice(s) de molécules inhibitrices pendant l'affinage, qui permettrait de réduire fortement le nombre de cas, ramenant ceux-ci à moins d'un cas pour les fromages à PMCFb et à PPNCCb. Il s'agit d'autre part de deux mesures appliquées chez les consommateurs (l'éviction des réfrigérateurs ayant des températures au-delà de 4 °C et au-delà de 8 °C) qui permettraient également de réduire fortement l'incidence (moins de 1 cas prédict par an). Il est important de rappeler que la cible réglementaire est 4°C, la valeur de 8°C étant une valeur utilisée pour tester l'effet d'un mésusage (ISO 2019). Par ailleurs, il est à noter que l'effet relativement similaire d'un maintien en dessous de 4°C ou de 8°C, constaté ici sur les fromages au lait cru, ne peut pas être généralisé à d'autres denrées (par ex. viande et poisson).

L'éviction de consommation chez les personnes âgées de plus de 65 ans permettrait de réduire de 31 le nombre de cas de listérioses. Et la non-consommation de la croûte permettrait de diviser par environ cinq le nombre de cas selon le produit (réduction globale de 30 cas), cette mesure étant plus efficace pour les PMCLb et les PPNCCb.

Enfin, la mesure consistant à ne pas consommer le fromage après 4 semaines de conservation au domicile présente également une certaine efficacité. Elle n'est toutefois pas retenue par le GT (cf. 6.2.1) car elle conduit à l'augmentation du risque pour *Salmonella* et STEC.

6.2.3 Effet de la combinaison de mesures (illustré à partir des mesures efficaces sur les STEC dans le cas des PMCF au lait cru de bovins)

La Figure 35 présente l'efficacité de neuf combinaisons de mesures de maîtrise efficaces identifiées pour les STEC sur la réduction de cas graves associés à ces bactéries. Pour chaque combinaison, trois barres distinctes illustrent : (i) l'effet de la première mesure appliquée seule (bleu), (ii) l'effet de la deuxième mesure appliquée seule (rouge), et (iii) l'effet

combiné observé lors de l'application séquentielle des deux mesures (vert). Les données pour le scénario de référence sont pour rappel de 95 cas graves pour les STEC. Les réductions sont exprimées en nombre de cas graves évités (valeurs négatives sur l'axe des ordonnées). Les combinaisons testées incluent l'ensemble des mesures efficaces individuellement pour les STEC, à savoir l'éviction des troupeaux porteurs du sérotype O26:H11 (O26gl), l'exclusion du lait de tank de fabrication si la concentration de *E. coli* dépasse 10 UFC/mL, l'acidification rapide, l'analyse systématique des lots pour la présence de STEC (n=5), et l'éviction de consommation chez les enfants de moins de 10 ans. L'analyse des résultats (Figure 34) montre que l'effet combiné de deux mesures ne correspond pas à la somme arithmétique de leurs effets individuels (ce n'est pas un modèle additif). Comme les mesures de maîtrise agissent de manière séquentielle sur la même population de cas, l'effet combiné attendu suit plutôt un modèle multiplicatif où la seconde mesure agit sur les cas résiduels non prévenus par la première mesure. Mathématiquement, si la première mesure prévient une fraction p_1 des cas et la seconde une fraction p_2 , l'efficacité combinée attendue selon le modèle multiplicatif est $1 - (1-p_1) \times (1-p_2)$. Cette formulation reflète le fait que la seconde mesure ne peut agir que sur les cas non prévenus par la première, soit $(1-p_1)$ de la population initiale.

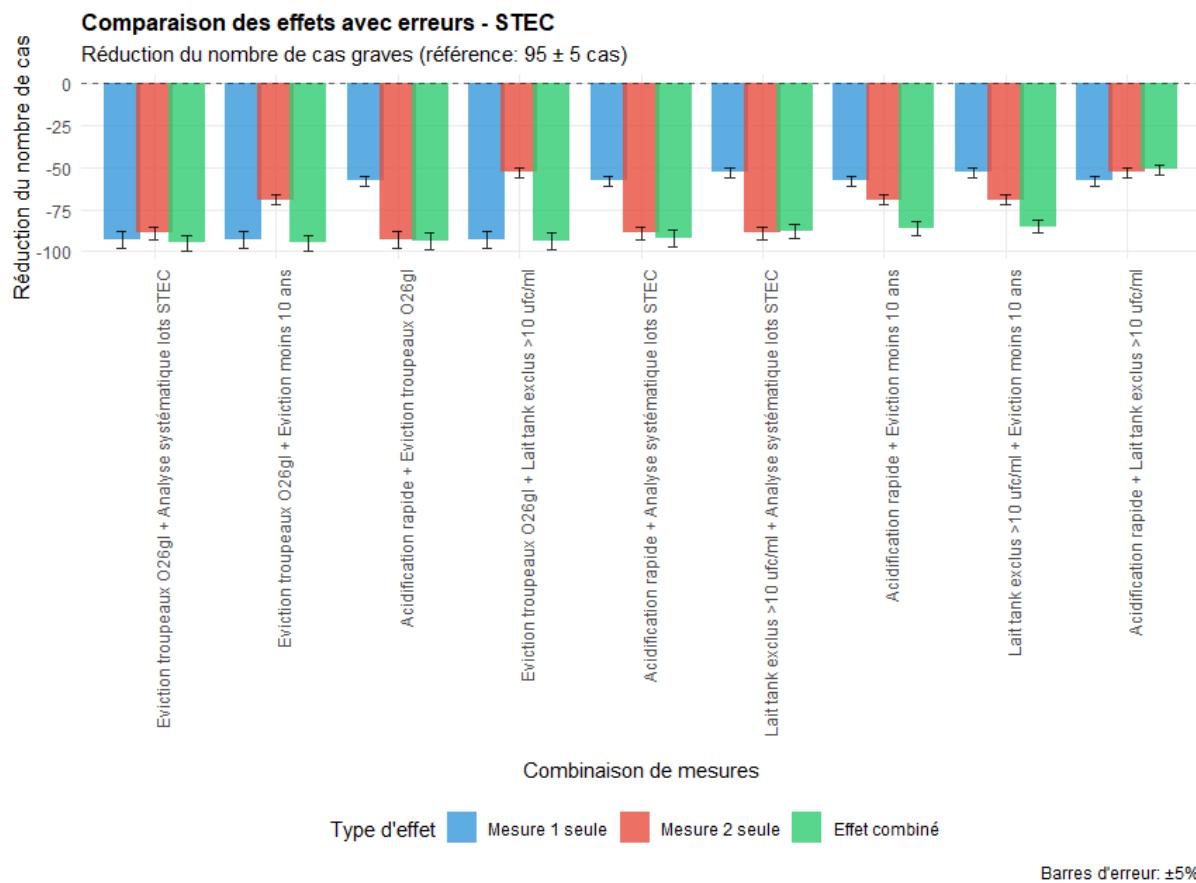


Figure 35 Comparaison des effets individuels et combinés des mesures efficaces pour les STEC sur le nombre de cas graves liés aux STEC.

L'analyse des résultats révèle que pour les STEC (bactérie pathogène cible des mesures), les effets combinés observés suivent majoritairement le modèle multiplicatif, avec quelques divergences ponctuelles suggérant des interactions spécifiques entre certaines mesures. Par exemple, la combinaison « Éviction troupeaux O26gl + Analyse systématique lots » atteint -95 cas observés pour -94 cas prédicts, illustrant une interaction quasi parfaite avec le modèle

multiplicatif théorique, tandis que la combinaison « Acidification rapide + Lait tank exclus >10 ufc/mL » montre un effet combiné observé de -51 cas alors que le modèle multiplicatif prédirait environ -80 cas, révélant un antagonisme modéré ponctuel.

Toute évaluation de combinaisons de mesures de maîtrise particulières doit nécessairement passer par des simulations du modèle d'évaluation des risques pour capturer ces interactions complexes. Une approche simplifiée consistant à additionner ou même à multiplier les effets individuels s'avère insuffisante pour prévoir avec précision l'efficacité réelle des combinaisons, particulièrement lorsque les mesures agissent sur des mécanismes biologiques distincts ou interfèrent entre elles.

Au-delà de l'effet d'une mesure de maîtrise sur un agent pathogène donné, il est important de mesurer également son effet sur les deux autres agents pathogènes.

6.2.4 Efficacités des mesures applicables spécifiquement aux conditions fermières

Dans le cadre des productions fermières, deux mesures ont été spécifiquement évaluées : i) la surveillance du critère d'hygiène *E. coli* (au seuil de 50 ufc/mL) dans le lait cru entraînant l'arrêt de la production de fromages en cas de dépassement et ii) le suivi du pH des lots de fromage.

Le suivi du critère *E. coli* tous les 10 jours par l'ensemble des fermes impliquées dans la transformation fermière, associé à un arrêt de la production de fromages en cas de dépassement, permet de réduire de 4 cas le nombre de cas graves pour les STEC (sur un total de 17 cas estimés pour les différents fromages). Cette mesure n'a pas d'impact significatif sur le risque de cas graves associés à *Salmonella* et à *L. monocytogenes*.

Le suivi régulier du pH, associé à une élimination totale des lots avec des défauts d'acidification (10 % pour le scénario de base en production fermière), permet de réduire de 2 cas le nombre de cas graves liés aux STEC. Cette mesure n'a pas d'impact significatif sur le risque de cas graves associés à *Salmonella* et à *L. monocytogenes*.

Ces scénarios n'ont qu'un effet limité au regard des mesures présentées dans la section 6.2.2.

7 Recommandations de recherche

Toutes les recommandations proposées ci-après reposent sur les modèles d'appréciation du risque développés dans le cadre de cette saisine. Elles s'appuient sur la comparaison entre le scénario de base (qui reflète les pratiques actuelles chez les producteurs de lait, les transformateurs et les consommateurs) et des scénarios d'amélioration. Elles concernent les productions fermières et industrielles. Bien que toutes les mesures déjà incluses dans le scénario de base soient pertinentes, elles ne font pas l'objet de recommandations de recherche spécifiques, même si le GT rappelle qu'à ce jour, elles ne sont pas toutes systématiquement appliquées par les professionnels. En effet, l'objet de cette section est (i) de présenter des recommandations de recherche associées au modèle développé en lien avec les mesures testées dans les scénarios, ainsi que (ii) d'explorer de nouveaux leviers d'action.

Le GT propose ci-dessous des travaux qui peuvent s'organiser selon trois axes complémentaires. Le premier (section 7.1) concerne l'acquisition de nouvelles données afin de réduire les incertitudes du modèle. Le deuxième axe (section 7.2) vise à accompagner la mise en œuvre des mesures de maîtrise identifiées comme les plus efficaces, en précisant les conditions de leur déploiement, leur faisabilité et leur acceptabilité par les acteurs de la filière. Le troisième axe (section 7.3) propose des pistes de recherche à plus long terme pour explorer de nouveaux leviers d'action, mieux comprendre les interactions biologiques en jeu et adapter les approches de modélisation aux spécificités des produits au lait cru.

7.1 Quelles données pour améliorer la précision des résultats du modèle ?

Ci-dessous sont listées des recommandations d'études à mener en priorité et à court terme pour acquérir des données afin de rendre les sorties du modèle plus précises. Elles s'appuient sur les analyses d'incertitude (5.3.1 et 5.3.2).

À la ferme

- Acquérir des données permettant de réduire l'incertitude associée à la prévalence de portage des STEC et de *Salmonella* chez les animaux. Il s'agit plus particulièrement de la proportion de souches de STEC du sérotype O26:H11 chez les animaux (prop_O26_u) ; la proportion de souches de STEC du groupe I parmi les animaux (pSTECgI_u) ; la prévalence d'animaux porteurs de STEC des groupes I et III du top V (p_STEC_I_III_topV_u) ; la proportion de souches de *Salmonella* appartenant à la catégorie des souches les plus virulentes (prop_HV_u). Cette caractérisation des niveaux de portage est nécessaire pour les trois types d'élevage (bovin, caprin, ovin) et devrait couvrir les différentes régions géographiques associées aux catégories de fromages.
- Acquérir des données sur la quantité de *Salmonella* dans les matières fécales (meanlog10_Salmonella_u et p_Salmonella_u).
- Comparer la proportion d'animaux porteurs de *Salmonella* entre les fermes ayant une bonne maîtrise de l'hygiène et les autres (F_hyg_Salmonella_u).
- Définir les niveaux d'excrétion d'*E. coli*, de STEC et de *Salmonella* (fréquence et intensité) dans les fèces (p_Salmonella), et le niveau de prévalence de *L. monocytogenes* dans le lait (p_obs_Lm) pour les ovins et caprins.

- Préciser les facteurs de risque de portage digestif chez les trois espèces animales en veillant à ce que les conditions de l'étude permettent le transfert de ces résultats dans le modèle d'AQR (voir section 3).
- Comprendre, en réalisant des enquêtes épidémiologiques dédiées et/ou en utilisant les données des filières, l'implication des conditions d'hygiène de la traite sur la contamination initiale des laits.

Dans les ateliers de fabrication

- Générer des données *via* des *challenge-tests* ou des tests de vieillissement sur des lots naturellement contaminés, relatifs à l'inactivation des STEC et de *Salmonella* dans le cœur et/ou sur la croûte du fromage. Plus précisément, il s'agit de réduire l'incertitude associée aux paramètres suivants : inactivation pendant l'affinage des STEC O26:H11 à cœur (ripening_STECO26_core_u) ; effet de l'affinage sur les STEC non O26:H11 dans la croûte (ripening_STECnonO26_rind_u) ; effet de l'affinage sur *Salmonella* à cœur (ripening_Salmonella_core_u) ; effet de l'affinage sur *Salmonella* dans la croûte (ripening_Salmonella_rind_u).
- Générer des données *via* des challenge-tests sur la croissance de *L. monocytogenes* afin d'estimer la vitesse spécifique de croissance sur matrice fromage (mu_opt_listeria_u) ; caractériser l'inactivation de *L. monocytogenes* qui intervient juste après l'étape de salage (salting_listeria_u).
- Quantifier la contamination des fromages par *L. monocytogenes* par l'environnement de l'atelier de fabrication (r_reconta_u).
- Acquérir des données quantitatives sur la distribution des différents agents pathogènes entre le caillé et le lactosérum (w_loss_u).

Chez le consommateur

- Acquérir des données permettant de quantifier les pratiques de consommation parmi les populations sensibles, susceptibles de moduler l'exposition du consommateur aux dangers (durée et température de conservation, affinage, consommation partielle ou différée du produit, pratiques culinaires, etc.), qui n'ont pas toujours été finement intégrées dans le modèle faute d'information. À noter que ce type de données est difficile à acquérir car les enquêtes actuelles, basées sur des données déclaratives, peuvent fournir des informations biaisées (le consommateur peut par exemple sur- ou sous-estimer sa consommation ou omettre certaines pratiques, en toute bonne foi).
- Acquérir des données visant à distinguer les profils des consommateurs réguliers et occasionnels, et les différents comportements alimentaires au sein du foyer. Le modèle gagnerait notamment en précision si la consommation de fromages au lait cru était mieux définie par catégorie d'âge chez les enfants (<3, <5 et <10 ans) (fréquence et quantité) ; le manque d'information a conduit à sous-évaluer cette consommation dans le modèle actuel ce qui s'est traduit, pour les STEC, à sous-estimer l'importance de la mesure d'éviction de la consommation chez les enfants de moins de 3 ans ou de moins de 5 ans (seule la mesure d'éviction pour les enfants de <10ans a été identifiée comme efficace).
- Enrichir le modèle par des résultats d'études portant sur les pratiques de consommation spécifiques à chaque type de fromage : quantité consommée, modes de conservation, circuits d'achat (fromager, supermarché, vente directe), etc. Ces informations permettraient d'identifier d'éventuelles corrélations entre les profils de consommation et les niveaux d'exposition.

7.2 Recommandations à court et moyen termes liées aux mesures de maîtrise les plus efficaces

7.2.1 Concevoir des actions à court et moyen terme, au niveau de la ferme.

Pour rappel, au niveau de la ferme, les mesures de maîtrise les plus efficaces concernant les dangers STEC et *Salmonella* sont l'introduction de nouveaux animaux issus de troupeaux indemnes de STEC O26:H11 stx2a+ et/ou stx2d+ (groupe I) et l'introduction de nouveaux animaux indemnes de *Salmonella* Dublin. Leur efficacité est conditionnée à la disponibilité de méthodes spécifiques et sensibles permettant la détection des STEC O26:H11 (groupe I) et de *Salmonella* Dublin :

Pour les STEC O26:H11 du groupe I, le statut « indemne » ou « non indemne » des troupeaux d'origine des nouveaux animaux vis-à-vis de ces STEC peut être établi sur la base d'une surveillance réalisée à partir des filtres à lait des tanks au niveau de ces fermes (voir section 4.2.1.1.2). Les méthodes de détection utilisées en routine pour détecter les STEC O26:H11 dans les aliments (méthodes de référence ou méthodes alternatives validées) peuvent être utilisées pour réaliser cette surveillance à partir des filtres à lait. Une étude pourrait être réalisée afin de définir les modalités (par exemple la fréquence des analyses) et vérifier la faisabilité et l'efficacité de cette mesure de maîtrise.

Pour *Salmonella* Dublin, l'introduction de nouveaux animaux indemnes de cette bactérie pathogène (animaux issus de troupeaux indemnes ou testés individuellement) constitue également une mesure de maîtrise prometteuse à la ferme. Toutefois, la mise en œuvre de cette stratégie suppose l'existence d'un dispositif de surveillance fiable et opérationnel, permettant de garantir le statut sanitaire des troupeaux fournisseurs. Des travaux seraient nécessaires pour évaluer la faisabilité et l'efficacité de cette mesure dans différents contextes d'élevage (taille de troupeau, type de filière, organisation sanitaire régionale), en tenant compte notamment de la fréquence et des modalités de dépistage. Les expériences danoises ou anglaises (cf. section 3.) permettent d'avoir de premières indications sur le déploiement d'une telle surveillance.

En parallèle, même si la vaccination n'a pas été testée dans le modèle faute de données suffisantes, il serait pertinent d'examiner si elle pourrait constituer un moyen efficace pour réduire le portage de *Salmonella* et des STEC O26:H11, et donc la présence de ces agents dans le lait de tank. Des travaux seraient nécessaires pour évaluer ses modalités pratiques de mise en œuvre — par exemple déterminer s'il est préférable de vacciner les mères gestantes, les génisses, ou les deux — ainsi que la possibilité d'intégrer ces cibles dans des vaccins multivalents déjà utilisés. Ces mesures (ou toutes mesures à appliquer à la ferme) ne peuvent être conduites en l'absence d'actions d'accompagnement des éleveurs. Concernant ces actions, il serait nécessaire de mener des études de deux ordres : (i) évaluer la pertinence des formations qui leur sont dispensées actuellement en vue de les améliorer si nécessaire, et, (ii) comprendre pourquoi l'ensemble de la profession n'applique pas toutes les mesures (y compris celles de base) :

- (i) Vis-à-vis de la pertinence des formations professionnelles, des études seraient nécessaires pour caractériser l'impact des actions de formation délivrées aux éleveurs et à leurs organismes de conseils sur la qualité du lait, en évaluant les programmes pédagogiques de sensibilisation des éleveurs aux risques microbiologiques et à l'importance des bonnes pratiques. Ceci est d'autant plus vrai

- pour les éleveurs novices dans la filière lait cru. En fonction des résultats obtenus à partir de ces études, des améliorations de ces formations pourraient être proposées.
- (ii) Vis-à-vis de la non-application des mesures de maîtrise par certains éleveurs, des études pluridisciplinaires (socio-économiques et anthropologiques) portant sur les déterminants du comportement des éleveurs au regard de leur adhésion à l'application des mesures d'hygiène seraient nécessaires. Les résultats de ces études pourraient permettre d'identifier des leviers d'action et venir enrichir (sur le fond et la forme) les formations délivrées aux éleveurs et à leurs organismes de conseils.

7.2.2 Concevoir des actions à court et moyen terme, au niveau de la fabrication.

Pour rappel, les mesures de maîtrise les plus efficaces identifiées pour limiter le développement des bactéries pathogènes lors de la fabrication sont l'acidification rapide du lait (pour *Salmonella* et STEC) et l'utilisation de souches de bactéries productrices de molécules inhibitrices (pour *L. monocytogenes*).

La collecte de données de terrain sur les cinétiques d'acidification selon les types de fromages permettrait d'affiner la compréhension des pratiques utilisées et de nourrir le modèle actuel. L'impact de la mesure « acidification rapide », efficace sur la réduction de cas graves associés à *Salmonella* et STEC pourra être évaluée avec une plus grande précision pour chaque type de fromage. Pour renforcer sa mise en œuvre, il sera nécessaire de sensibiliser/former les transformateurs, notamment fermiers, à l'importance du suivi et de la maîtrise de l'acidification, en s'appuyant sur les acteurs de terrain.

Concernant les souches de bactéries productrices de molécules inhibitrices, des travaux complémentaires sont à envisager pour sélectionner des couples ferment/technologie efficaces contre *L. monocytogenes*, sans altérer les qualités organoleptiques des fromages. L'effet inhibiteur devra être évalué en conditions réelles, notamment à l'aide de challenge-tests. Si les résultats sont concluants, ceci permettrait de confirmer l'effet de la mesure « molécule inhibitrice » sur la réduction de cas graves associés à *L. monocytogenes*.

Pour être pleinement considérées comme des mesures de maîtrise au sens des PMS des industriels, ces deux mesures (acidification et utilisation de souches inhibitrices) devraient faire l'objet d'une validation par les entreprises et/ou la filière.

Les résultats de ces actions visant à améliorer les mesures de maîtrise pourront être implémentés par le gestionnaire dans le module « fabrication » du modèle.

7.2.3 Concevoir des actions à court et moyen terme, avec l'aide des spécialistes en SHS, afin d'augmenter la sensibilisation du consommateur et d'orienter ses habitudes.

Pour rappel, au niveau du consommateur, les mesures de maîtrise les plus efficaces identifiées dans ces travaux sont : (i) l'évitement de la consommation de certains fromages au lait cru pour les enfants de moins de 10 ans et les personnes âgées de plus de 65 ans, (ii) la non consommation de la croûte, et (iii) la maîtrise de la température de réfrigération (<4 °C ou <8 °C).

Plusieurs leviers peuvent être activés pour soutenir ces mesures :

- informer le consommateur :
 - il est constaté en effet un manque de connaissance générale des consommateurs sur certains aspects des produits qu'ils consomment notamment les modes de production (fermier, artisanal, industriel) et les risques microbiologiques associés (particulièrement la distinction entre fromages au lait cru, microfiltré, pasteurisé ou thermisé). Plus largement, une campagne de sensibilisation à l'hygiène domestique auprès du grand public est nécessaire. Ces actions de sensibilisation devraient s'inscrire dans une stratégie de communication multicanaux et multiplaces, et viser à promouvoir durablement les mesures d'hygiène domestique essentielles et généralistes (ex. maîtrise de la température de réfrigération), tout en intégrant ces messages dans les campagnes nutritionnelles et éducatives existantes. (Anses (2015)) ;
 - les professionnels en contact (fermiers réalisant de la vente directe, commerçants, ...) avec les consommateurs ont un rôle à jouer dans la communication des bonnes pratiques ;
- mobiliser les professionnels de santé, en mettant à jour leur niveau de connaissance et leur rôle dans le changement de comportement des publics à risque (jeunes enfants, personnes âgées...) ;
- renforcer l'adhésion à l'éviction de consommation de certains fromages au lait cru chez les enfants de moins de 10 ans, en proposant des supports de communication auprès des parents, des professionnels de santé et des professionnels de la petite enfance. Le carnet de santé constitue un support privilégié pour communiquer auprès des parents en y diffusant des messages clairs et précis ;
- adapter les recommandations à la catégorie des personnes âgées des plus de 65 ans.
 - pour les personnes autonomes, s'appuyer sur les professionnels de santé et sur des campagnes de communication généraliste (associations, municipalités...) pour les sensibiliser ;
 - pour les personnes en perte d'autonomie (celles vivant en institution ou celles bénéficiant d'une aide à domicile), communiquer auprès des professionnels de santé et des professionnels de l'aide à domicile pour rappeler auprès des personnes sensibles l'importance de l'éviction de consommation de certains fromages au lait cru ;
- promouvoir le contrôle ou la vérification des températures des réfrigérateurs à domicile, par l'usage de thermomètres de réfrigérateur ou d'équipements connectés.
- identifier les freins au suivi de ces recommandations. En effet, certains consommateurs bien qu'avertis, ne suivent pas les recommandations ; des études socio-anthropologiques seraient nécessaires pour analyser ces réticences, les conclusions des études viendraient appuyer les campagnes (sur le fond et la forme) auprès des consommateurs.

7.3 Quels travaux de recherche pour explorer et évaluer de nouvelles mesures de maîtrise ?

Ce troisième axe propose des pistes de recherche à plus long terme. Ces études pourraient permettre i) de mieux comprendre l'interaction entre les bactéries pathogènes et les autres espèces des différents microbiotes dans lesquelles elles évoluent, de la ferme au fromage, en vue de quantifier le comportement des agents pathogènes et d'identifier des mesures qui limiteraient leur développement, ii) d'améliorer les approches de prévision du comportement des bactéries pathogènes et des interactions avec les autres espèces par le biais de développement de modèles.

7.3.1 Pathogènes et microbiotes

Concernant l'étude des écosystèmes à la ferme, le GT propose de :

- mieux décrire la diversité (de composition, de structure-fonctions et des interactions) des microbiotes intestinaux des animaux d'élevage, leur évolution dans le temps de production de l'animal et selon les typologies d'élevages ;
- continuer à explorer comment des microorganismes bénéfiques (dans l'environnement, la nourriture et le tractus intestinal des animaux) peuvent limiter la croissance et le portage animal des agents pathogènes (salmonelles, STEC de sérotype O26:H11,...) et au final la présence de ces agents dans le lait de tank ;
- conduire des travaux visant à sélectionner des bactéries ou développer des complexes bactériens utilisables comme probiotique pour les animaux ;
- évaluer l'effet de l'alimentation (qualité intrinsèque de l'aliment, des rations distribuées ou d'un changement de l'alimentation) sur le microbiote intestinal des animaux et leur impact sur la santé des animaux, le bien-être (notamment l'inflammation, même modérée, du tractus digestif dont on sait qu'elle peut influer sur la colonisation par les *E. coli* et les salmonelles) ou encore sur l'excration des agents pathogènes.

En lien avec ces études, le GT propose également de :

- renforcer les connaissances de l'impact sur la qualité sanitaire du lait cru et/ou sur la dissémination inter-élevages des agents pathogènes :
 - des différentes pratiques et itinéraires d'élevage ;
 - de la qualité de l'eau utilisée pour nettoyer les équipements et pour abreuver les animaux ;
 - de l'hygiène des locaux et des conditions de traite (efficacité des protocoles de nettoyage des trayons et des équipements de traite vis-à-vis de la réduction de la contamination des surfaces par des agents pathogènes [biofilms]).
- explorer les relations entre la santé et le bien-être des ruminants (notamment les mammites, mais aussi d'autres affections) et la contamination bactérienne du lait. Il serait intéressant d'identifier des marqueurs d'infection ou d'inflammation chez les animaux qui permettraient d'améliorer la détection des microorganismes d'intérêt, au-delà des indicateurs classiques comme les cellules somatiques dans le lait.

Concernant l'étude des écosystèmes en fabrication, le GT propose de continuer les efforts de recherche afin de :

- mieux comprendre les interactions entre le microbiote naturel des laits crus (bovin, ovin, caprin) et les agents pathogènes tout au long du processus d'élaboration des fromages au lait cru ;

- étudier la relation entre les fonctionnalités des micro-organismes d'affinage, les évolutions des caractéristiques physico-chimiques de la matrice fromage en surface et à cœur (pH, a_w , composition particulière) et le comportement des agents pathogènes (croissance ou inactivation) ;
- comprendre de quelle manière l'évolution physico-chimiques du caillé fromager en formation conditionne la présence et l'évolution des agents pathogènes, en prenant en compte leur diversité et leur variabilité, pour prévoir leur niveau d'interaction avec le caillé.

7.3.2 Quantification - modélisation

Concernant la modélisation le GT propose de :

- connaître les mécanismes conduisant à la super-excrétion des STEC et des entérobactéries en général. En effet, la proportion d'animaux super-excréteurs de STEC dans les matières fécales est une donnée d'entrée du modèle qui intervient dans l'estimation des infections à STEC. Or la super-excrétion n'est pas un phénomène continu et les données actuelles de la littérature ne permettent pas d'expliquer ni de prévoir la fréquence de ces phénomènes dont le déterminisme est vraisemblablement multifactoriel ;
- prendre en compte l'effet saison dans le modèle pour réduire les incertitudes tant au niveau de la production que de la consommation. Cet effet saison nécessiterait non seulement d'acquérir des données supplémentaires mais également de modifier le modèle pour inclure celui-ci. Cette recommandation est donc plus complexe à mettre en œuvre que celles listées en section 7.1, raison pour laquelle elle figure dans les pistes de recherche à plus long terme ;
- questionner les modèles de microbiologie prévisionnelle utilisés dans cette expertise qui, bien que largement adoptés dans la littérature, ne sont peut-être pas les plus adaptés au cas d'étude. En particulier i) approfondir l'effet « matrice » dans les modèles de croissance et de décroissance (par ex. effet sur la latence avant croissance ou inactivation), ii) considérer l'effet « flores annexes » dans les modèles de croissance et de décroissance, iii) remettre en question l'utilisation d'un modèle gamma sans interaction pour décrire le taux de croissance alors qu'on peut supposer un effet combiné inhibiteur (« *hurdle effect* ») résultant des températures réfrigérées, des pH, des acides organiques et de la matrice lait/fromage ; iv) développer des modèles prévisionnels qui intègrent davantage la dynamique de l'effet des procédés de transformation sur la croissance et l'inactivation des pathogènes ;
- explorer le développement d'un modèle dédié aux productions fermières, qui pourrait faire émerger des leviers propres à ces contextes, sous réserve de disposer de données fines sur les pratiques, aujourd'hui difficiles à acquérir et susceptibles d'impliquer une adaptation des modèles actuels ;
- explorer de nouvelles approches de modélisation s'appuyant sur le « *machine learning* » ou l'IA (exemple des approches de traitement des données massives issues des filières et des pratiques des consommateurs) et en faire une analyse critique ;
- identifier et acquérir les données nécessaires (et les formats utiles), pour des approches multicritères quantitatives de type bénéfice-risque pour la santé du consommateur ou même des évaluations coût-bénéfice de la filière (dimensions environnementale et économique comprises).

8 Conclusions du groupe de travail FALC2 et du CES BIORISK

Le travail d'expertise du GT FALC2 a permis de bâtir un modèle d'appréciation quantitative du risque reliant plusieurs mesures de maîtrise et de surveillance au nombre de cas de toxicités alimentaires (TIA) chez l'Homme liées à la consommation de fromage au lait cru²² (cas totaux, cas graves, décès). Les mesures de maîtrise ont été choisies sur la base des travaux du GT FALC1, complétées d'une analyse critique de la littérature récente.

Le modèle est construit en 3 modules : la ferme, la fabrication et la consommation de fromages. Cependant les acteurs associés à ces trois modules (respectivement les éleveurs, fabricants et consommateurs) n'ont pas le même rôle et surtout la même responsabilité au regard de la loi. Le [règlement \(CE\) n°178/2002](#) assigne la responsabilité de la sécurité des denrées aux professionnels qui les placent sur le marché²³.

Le modèle développé cible les 11 combinaisons danger/fromage/espèce animale qui ont été jugées comme prioritaires par le GT FALC1, à savoir :

- *Escherichia coli* productrices de shigatoxine (STEC) dans les fromages à pâte molle et croûte fleurie au lait de vache et au lait de chèvre, ainsi que dans les fromages à pâte pressée non cuite et affinage court au lait de vache et de brebis ;
- *Salmonella* dans les fromages à pâte molle à croûte fleurie au lait de vache et au lait de chèvre, ainsi que dans les fromages à pâte pressée non cuite à affinage court au lait de vache ;
- *L. monocytogenes* dans les fromages à pâte molle et croûte fleurie au lait de vache et au lait de chèvre, ainsi que dans les fromages à pâte molle et croûte lavée et dans les fromages à pâte pressée non cuite et affinage court au lait de vache.

Il est rappelé que les fromages à pâte cuite (par ex. emmenthal, gruyère, comté) ne sont pas des fromages à risque et ils ont été exclus des recommandations d'éviction de consommation pour les enfants de moins de cinq ans (Anses 2019a, 2019b), les femmes enceintes (Anses 2019d) et les personnes de plus de 65 ans (Anses 2019c). Ils ne sont donc pas concernés par cette étude. Le modèle développé ne donne aucune indication sur l'effet des mesures de maîtrise et de surveillance sur les autres dangers ou sur d'autres produits au lait cru

Le modèle a été développé à l'aide du logiciel R. Le code ainsi que les principales sorties du modèle sont disponibles dans l'entrepôt d'archives et de données Zenodo²⁴.

Le modèle actuel prend en compte les **mesures de maîtrise déjà en place** (scénario de base) et mises en œuvre par la plupart des éleveurs, des transformateurs et des consommateurs (voir section 3). Le modèle a permis de tester, via différents scénarios alternatifs, en production fermière et en production industrielle, des **mesures de maîtrise ou de surveillance supplémentaires** qui ne sont pas (ou seulement partiellement) appliquées à ce jour. Parmi celles-ci, les plus efficaces sont :

²² Des éléments du modèle développé pour *L. monocytogenes* (modules fabrication et consommateur) pourrait être utile à l'évaluation des risques de listérose en lien avec les fromages PMCF, PMCL et PPNCC au lait pasteurisé.

²³ <https://agriculture.gouv.fr/la-reglementation-sur-l-hygiene-des-aliments>

²⁴ 10.5281/zenodo.17647556

Pour réduire le nombre de **cas graves dus aux STEC** : l'introduction de nouveaux animaux provenant uniquement de troupeaux indemnes du sérototype O26:H11 (groupe I, *stx2a+* et/ou *stx2d+* ; Anses 2023), l'acidification la plus rapide possible du lait dans la gamme permise par la technologie concernée et sa maîtrise, l'éviction de la consommation pour les enfants de moins de 10 ans, l'exclusion, pour la transformation, des laits de tank contenant plus de 10 unités formant colonies par millilitre pour le critère d'hygiène *E. coli*, et la recherche systématique des STEC dans les lots de fromage (n = 5).

Pour réduire le nombre de **cas graves dus à *Salmonella*** : l'introduction de nouveaux animaux indemnes de *Salmonella* Dublin (issus de troupeaux indemnes ou testés individuellement), l'acidification la plus rapide possible du lait dans la gamme permise par la technologie concernée, la recherche de *Salmonella* dans le lait avant transformation, et systématiquement dans les lots de fromage (n = 5).

Pour réduire le nombre de **cas graves dus à *Listeria monocytogenes*** : l'utilisation de souches productrices de molécules inhibitrices lors de la fabrication, la maîtrise de la température de réfrigération (moins de 4 °C et moins de 8 °C) chez le consommateur, l'éviction de la consommation pour les personnes âgées de plus de 65 ans, et la non-consommation de la croûte pour l'ensemble de la population. Il est important de rappeler que la température cible de réfrigération est 4°C, la valeur de 8°C étant une valeur utilisée pour tester l'effet d'un mésusage. Par ailleurs, l'effet relativement similaire d'un maintien en dessous de 4 °C ou de 8 °C, constaté dans ce rapport sur les fromages au lait cru, ne peut pas être généralisé à d'autres denrées (par ex. viande et poisson).

Deux mesures efficaces spécifiquement pour un danger n'ont pas été retenues en raison d'effets antagonistes avec les autres dangers. Ainsi, l'allongement de la durée d'affinage réduit les cas d'infection à STEC et *Salmonella* mais accroît le risque de listériose. De la même façon, la mesure consistant à ne pas avoir de consommation après 4 semaines de conservation est efficace contre la listériose mais accroît le risque d'infections à STEC et *Salmonella*.

Les mesures les plus efficaces ont été identifiées indépendamment de leur faisabilité opérationnelle, de leur coût et de leur acceptabilité par les différentes parties prenantes impliquées dans la production de lait, la transformation ou la consommation de fromage au lait cru en France. Toutefois, une série d'actions pour accompagner leur mise en œuvre et vérifier leur efficacité sur le terrain a été proposée (voir section 7.2). De plus, le GT a listé des pistes d'amélioration du modèle lui-même, à court terme, portant sur la précision des résultats (voir section 7.1), ainsi que des actions de recherche à plus long terme (section 7.3).

Date de validation du rapport d'expertise collective par le groupe de travail : 11 septembre 2025

9 Bibliographie

9.1 Publications

- Addis, Maria Filippa, Tiziana Cubeddu, Ylenia Pilicchi, Stefano Rocca, and Renata Piccinini. 2019. "Chronic intramammary infection by *Listeria monocytogenes* in a clinically healthy goat—a case report." *BMC veterinary research* 15: 1-7.
- Anses. 2014. *Avis et rapport d'expertise collective. Information des consommateurs en matière de prévention des risques biologiques liés aux aliments. Tome 1 - Hiérarchisation des couples danger/aliment et état des lieux des mesures d'information.* <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2012sa0118Ra-01.pdf>.
- Anses. 2017. *Avis et rapport d'expertise collective - Étude individuelle nationale des consommations alimentaires* 3 (INCA) 3) <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf>.
- Anses. 2018a. *Avis relatif à l'évaluation des protocoles d'échantillonnage des laits et fromages morbier et mont d'or en vue de réduire le risque épidémique de salmonellose.* Disponible à <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2016SA0168.pdf>.
- Anses. 2018b. *Avis relatif au protocole de reprise de la commercialisation de reblochons proposé par l'entreprise Chabert.* <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2018SA0164.pdf>.
- Anses. 2019. *Avis relatif à l'actualisation des repères alimentaires du PNNS pour les femmes dès la ménopause et les hommes de plus de 65 ans.* <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2017SA0143.pdf>.
- Anses. 2020. *Note d'appui scientifique relatif à l'établissement d'un cahier des charges en vue d'une étude épidémiologique relative au risque lié aux *E. coli* entérohémorragiques (et *E. coli* O26 en particulier) dans la filière reblochon.* <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2019SA0104.pdf>.
- Anses. 2022. *AVIS de l'Anses relatif aux modalités de maîtrise du risque lié à la présence de dangers microbiologiques dans les fromages et autres produits laitiers fabriqués à partir de lait cru.* <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2019SA0033.pdf>.
- Anses. 2023. *Avis relatif à la définition des souches pathogènes d'*Escherichia coli* productrices de shigatoxines.* <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2020SA0095.pdf>.
- Anses. 2024. *Avis relatif à l'évaluation du risque de transmission du complexe *Mycobacterium tuberculosis* à l'humain via la consommation de produits laitiers crus issus d'un élevage caprin infecté.*
- Anses. 2025. *Rapport TBEV.*
- Augustin, J-C, Véronique Zuliani, Marie Cornu, and Laurent Guillier. 2005. "Growth rate and growth probability of *Listeria monocytogenes* in dairy, meat and seafood products in suboptimal conditions." *Journal of Applied Microbiology* 99 (5): 1019-1042.
- Auvray, Frédéric, Clémence Bièche-Terrier, Maryse Michèle Um, Véronique Dupouy, Nathalie Nzuzi, Laure David, Laurent Allais, Marie Drouet, Eric Oswald, and Delphine Bibbal. 2023. "Prevalence and characterization of the seven major serotypes of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* (STEC) in veal calves slaughtered in France." *Veterinary Microbiology* 282: 109754.
- Basak, Subhasish, J. Christy, L. Guillier, F. Audiat-Perrin, M. Sanaa, F. Tenenhaus-Aziza, Julien Bect, and Emmanuel Vazquez. 2023. "Minimizing the risk of foodborne illness and analytical costs using a QMRA model for raw milk cheeses." 12th International Conference on Predictive Modelling in Food, Sapporo (Japan).

- Basak, Subhasish, Laurent Guillier, Julien Bect, Janushan Christy, Fanny Tenenhaus-Aziza, and Emmanuel Vazquez. 2024. "Multipathogen quantitative risk assessment in raw milk soft cheese." *Microbial Risk Analysis* 27-28: 100318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mran.2024.100318>.
- Bemrah, N, M Sanaa, MH Cassin, MW Griffiths, and O Cerf. 1998. "Quantitative risk assessment of human listeriosis from consumption of soft cheese made from raw milk." *Preventive Veterinary Medicine* 37 (1-4): 129-145.
- Bibbal, Delphine, Estelle Loukiadis, Monique Kérourédan, Franck Ferré, Françoise Dilasser, Carine Peytavin de Garam, Philippe Cartier, Eric Oswald, Emilie Gay, and Frédéric Auvray. 2015. "Prevalence of carriage of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* serotypes O157: H7, O26: H11, O103: H2, O111: H8, and O145: H28 among slaughtered adult cattle in France." *Applied and environmental microbiology* 81 (4): 1397-1405.
- Bibbal, Delphine, Philippe Ruiz, Panagiotis Sapountzis, Christine Mazuy-Cruchaudet, Estelle Loukiadis, Frédéric Auvray, Evelyne Forano, and Hubert Brugère. 2022. "Persistent circulation of enterohemorrhagic *Escherichia coli* (EHEC) O157: H7 in cattle farms: Characterization of enterohemorrhagic *Escherichia coli* O157: H7 strains and fecal microbial communities of bovine shedders and non-shedders." *Frontiers in Veterinary Science* 9: 852475.
- Bigelow, WDI. 1921. "The logarithmic nature of thermal death time curves." *The Journal of Infectious Diseases*: 528-536.
- Bonifait, Laetitia, Amandine Thépault, Louise Baugé, Sandra Rouxel, Françoise Le Gall, and Marianne Chemaly. 2021. "Occurrence of *Salmonella* in the cattle production in France." *Microorganisms* 9 (4): 872.
- Botsaris, George, Kyriaki Nikolaou, Maria Liapi, and Christodoulos Pipis. 2016. "Prevalence of *Listeria* spp. and *Listeria monocytogenes* in cattle farms in Cyprus using bulk tank milk samples." *Journal of Food Safety* 36 (4): 482-488.
- Box, George E. P. 1976. "Science and Statistics." *Journal of the American Statistical Association* 71 (356): 791-799. <https://doi.org/10.1080/01621459.1976.10480949>.
- Cadavez, Vasco AP, Fernanda B Campagnollo, Rosicléia A Silva, Clara M Duffner, Donald W Schaffner, Anderson S Sant'Ana, and Ursula Gonzales-Barron. 2019. "A comparison of dynamic tertiary and competition models for describing the fate of *Listeria monocytogenes* in Minas fresh cheese during refrigerated storage." *Food microbiology* 79: 48-60.
- Carnio, M.C., Alexandra Höltzel, Melanie Rudolf, Thomas Henle, Günther Jung, and Siegfried Scherer. 2000. "The Macroyclic Peptide Antibiotic Micrococcin P1 Is Secreted by the Food-Borne Bacterium *Staphylococcus equorum* WS 2733 and Inhibits *Listeria monocytogenes* on Soft Cheese." *Applied and Environmental Microbiology* 66 (6): 2378-2384. <https://doi.org/10.1128/AEM.66.6.2378-2384.2000>.
- Carnio, Markus C, Alexandra Höltzel, Melanie Rudolf, Thomas Henle, Günther Jung, and Siegfried Scherer. 2000. "The macrocyclic peptide antibiotic micrococcin P1 is secreted by the food-borne bacterium *Staphylococcus equorum* WS 2733 and inhibits *Listeria monocytogenes* on soft cheese." *Applied and Environmental Microbiology* 66 (6): 2378-2384.
- Cassin, Michael H., Greg M. Paoli, and Anna M. Lammerding. 1998. "Simulation modeling for microbial risk assessment." *Journal of Food Protection* 61 (11): 1560-1566. <https://doi.org/https://doi.org/10.4315/0362-028X-61.11.1560>.
- Castro, H., Anniina Jaakkonen, Marjaana Hakkinen, Hannu Korkeala, and Miia Lindström. 2018. "Occurrence, persistence, and contamination routes of *Listeria monocytogenes* genotypes on three Finnish dairy cattle farms: a longitudinal study." *Applied and environmental microbiology* 84 (4).

- Castro, Vinicius Silva, Eduardo Figueiredo, Tim McAllister, and Kim Stanford. 2022. "Farm to fork impacts of super-shedders and high-event periods on food safety." *Trends in Food Science & Technology* 127: 129-142.
- Clough, Helen E, Damian Clancy, and Nigel P French. 2009. "Quantifying exposure to vero-cytotoxigenic *Escherichia coli* O157 in milk sold as pasteurized: a model-based approach." *International journal of food microbiology* 131 (2-3): 95-105.
- Conrady, B., E. H. Dervic, P. Klimek, L. Pedersen, M. Merhi Reimert, P. Rasmussen, O. O. Apenteng, and L. R. Nielsen. 2024. "Social network analysis reveals the failure of between-farm movement restrictions to reduce *Salmonella* transmission." *Journal of Dairy Science* 107 (9): 6930-6944. <https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2023-24554>.
- Cummings, Kevin J, Lorin D Warnick, Mara Elton, Yrjo T Gröhn, Patrick L McDonough, and Julie D Siler. 2010. "The effect of clinical outbreaks of salmonellosis on the prevalence of fecal *Salmonella* shedding among dairy cattle in New York." *Foodborne Pathogens and Disease* 7 (7): 815-823.
- David, J. M., P. Sanders, N. Bemrah, S. A. Granier, M. Denis, F. X. Weill, D. Guillemot, and L. Watier. 2013. "Attribution of the French human Salmonellosis cases to the main food-sources according to the type of surveillance data." *Preventive Veterinary Medicine* 110 (1): 12-27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2013.02.002>.
- Davison, H. C., A. R. Sayers, R. P. Smith, S. J. S. Pascoe, R. H. Davies, J. P. Weaver, and S. J. Evans. 2006a. "Risk factors associated with the salmonella status of dairy farms in England and Wales." *Veterinary Record* 159 (26): 871. <https://doi.org/10.1136/vr.159.26.871>.
- Davison, HC, AR Sayers, RP Smith, SJS Pascoe, RH Davies, JP Weaver, and SJ Evans. 2006b. "Risk factors associated with the *Salmonella* status of dairy farms in England and Wales." *Veterinary Record* 159 (26): 871-880.
- Dawson, D.E., Jocelyn H Keung, Monica G Napoles, Michael R Vella, Shi Chen, Michael W Sanderson, and Cristina Lanzas. 2018. "Investigating behavioral drivers of seasonal Shiga-toxigenic *Escherichia coli* (STEC) patterns in grazing cattle using an agent-based model." *Plos one* 13 (10): e0205418.
- Delafosse, Arnaud, Baptiste Poupée, Christine Julien, and Raphaël Guatteo. 2018. "Vaccination et supplémentation alimentaire en levures pour la maîtrise des salmonelles en élevage bovin laitier." *Bull. GTV* 90: 63-70.
- Delannoy, S., Maï-Lan Tran, and Patrick Fach. 2022. "Insights into the assessment of highly pathogenic Shiga toxin-producing *Escherichia coli* in raw milk and raw milk cheeses by high throughput real-time PCR." *International Journal of Food Microbiology* 366: 109564.
- Delignette-Muller, Marie Laure, M Cornu, and Afssa Stec Study Group. 2008. "Quantitative risk assessment for *Escherichia coli* O157: H7 in frozen ground beef patties consumed by young children in French households." *International journal of food microbiology* 128 (1): 158-164.
- DGAL. 2023. *DGAL/MUS/2023-11. Révision et publication du Guide d'aide à la gestion des alertes d'origine alimentaire à l'usage des exploitants du secteur alimentaire et de l'administration.*
- Dixon, Andrea, Natalia Cernicchiaro, Raghavendra G Amachawadi, Xiaorong Shi, Charley A Cull, and David G Renter. 2020. "Longitudinal characterization of prevalence and concentration of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* serogroups in feces of individual feedlot cattle." *Foodborne Pathogens and Disease* 17 (10): 631-639.
- Dubuisson, C., S. Carrillo, A Dufour, S Havard, P Pinard, and JL Volatier. 2017. "The French dietary survey on the general population (INCA3) French Agency on Food, Environmental and Occupational Health and Safety (ANSES)."

- Dubuisson, Carine, Ariane Dufour, Sandrine Carrillo, Peggy Drouillet-Pinard, Sabrina Havard, and Jean-Luc Volatier. 2019. "The Third French Individual and National Food Consumption (INCA3) Survey 2014–2015: method, design and participation rate in the framework of a European harmonization process." *Public health nutrition* 22 (4): 584-600.
- EFSA, and ECDC. 2021. "The European Union One Health 2019 Zoonoses Report." *EFSA Journal* 19 (2).
- EFSA, and ECDC. 2022. "The European Union One Health 2021 Zoonoses Report." *EFSA Journal* 20 (12): e07666. <https://doi.org/https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.7666>.
- EFSA, and ECDC. 2023. "The European Union One Health 2022 Zoonoses Report." *EFSA Journal* 21 (12).
- EFSA, and ECDC. 2024. "The European Union One Health 2023 Zoonoses report." *EFSA Journal* 22 (12): e9106. <https://doi.org/https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.9106>.
- EFSA Panel on Biological Hazards. 2015. "Scientific Opinion on the public health risks related to the consumption of raw drinking milk." *EFSA Journal* 13 (1): 3940.
- EFSA Panel on Biological Hazards, Antonia Ricci, Ana Allende, Declan Bolton, Marianne Chemaly, Robert Davies, Pablo Salvador Fernández Escámez, Rosina Girones, Lieve Herman, Konstantinos Koutsoumanis, R Lindqvist, B Nørrung, A Ricci, L. Robertson, G. Ru, M. Sanaa, M. Simmons, P. Skandamis, E. Snary, N. Speybroeck, B. Ter Kuile, J. Threlfall, and H. Wahlström. 2018. "Listeria monocytogenes contamination of ready-to-eat foods and the risk for human health in the EU." *EFSA Journal* 16 (1): e05134.
- Ennahar, Saïd, Omar Assobhei, and Claude Hasselmann. 1998. "Inhibition of *Listeria monocytogenes* in a smear-surface soft cheese by Lactobacillus plantarum WHE 92, a pediocin ACh producer." *Journal of Food Protection* 61 (2): 186-195.
- Eppert, Ilka, Natalia Valdés-Stauber, H Götz, Martin Busse, and Siegfried Scherer. 1997. "Growth reduction of *Listeria* spp. caused by undefined industrial red smear cheese cultures and bacteriocin-producing *Brevibacterium* lines as evaluated in situ on soft cheese." *Applied and environmental microbiology* 63 (12): 4812-4817.
- FAO, and WHO. 2021. "Microbiological Risk Assessment—Guidance for food (Vol. 36)."
- FAO, and WHO. 2022. *Control measures for Shiga toxin-producing Escherichia coli (STEC) associated with meat and dairy products. Meeting report. Microbiological Risk Assessment Series No. 39. Rome.*
- FDA, and Health Canada. 2015. *Joint FDA / Health Canada Quantitative Assessment of the Risk of Listeriosis from Soft-Ripened Cheese Consumption in the United States and Canada: Report.*
- Fegan, N, P Vanderlinde, G Higgs, and P Desmarchelier. 2004. "Quantification and prevalence of *Salmonella* in beef cattle presenting at slaughter." *Journal of Applied Microbiology* 97 (5): 892-898.
- Filter, Matthias, Thomas Schüler, and Racem Ben Romdhane. 2024. "Food Safety Knowledge Exchange (FSKX) format: current status and strategic development plans based on a SWOT analysis." *Microbial Risk Analysis*: 100309.
- Foster, Neil, Ying Tang, Angelo Berchieri, Shizhong Geng, Xinan Jiao, and Paul Barrow. 2021. "Revisiting persistent *Salmonella* infection and the carrier state: what do we know?" *Pathogens* 10 (10): 1299.
- FSIS. 2024. *Quantitative risk assessment for *Salmonella* in raw chicken and raw chicken products.* <https://www.fsis.usda.gov/science-data/risk-assessments/poultry-risk-assessment-files-salmonella-framework>.
- Gautier, JM, V Heuchel, C Laithier, and D Ribaud. 2003. "Fréquence et répartition de la contamination des ensilages par *Listeria monocytogenes*." *Rencontres autour des recherches sur les ruminants*: 215-218.

- Geue, L, M Segura-Alvarez, FJ Conraths, T Kuczus, J Bockemühl, H Karch, and P Gallien. 2002. "A long-term study on the prevalence of shiga toxin-producing *Escherichia coli* (STEC) on four German cattle farms." *Epidemiology & Infection* 129 (1): 173-185.
- Gonzales-Barron, Ursula, Vasco Cadavez, A. Valero, P. Skandamis, S. Kintzios, Alessandra De Cesare, Gerardo Manfreda, Fanny Tenenhaus-Aziza, Laurent Guillier, N. Boudhrioua, and F. Achemchem. 2022. *Report on the First Predictive Dynamic Models of the Viability of Pathogens along Processing of Mediterranean Artisanal Fermented Foods and Report on the Optimised Process Variables to Enhance their Microbiological Safety*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8118475>.
- Gonzalez, Gaëlle, Laure Bournez, Rayane Amaral Moraes, Dumarest Marine, Clémence Galon, Fabien Vorimore, Maxime Cochin, Antoine Nougairède, Catherine Hennechart-Collette, and Sylvie Perelle. 2022. "A one-health approach to investigating an outbreak of alimentary tick-borne encephalitis in a non-endemic area in France (Ain, Eastern France): A longitudinal serological study in livestock, detection in ticks, and the first tick-borne encephalitis virus isolation and molecular characterisation." *Frontiers in microbiology* 13: 863725.
- Haas, C.N., Joan Rose, and C. Gerba. 2014. "Uncertainty." In *Quantitative Microbial Risk Assessment, Second Edition*, 323-375.
- Hecker, Yanina Paola, Sara González-Ortega, Santiago Cano, Luis Miguel Ortega-Mora, and Pilar Horcajo. 2023. "Bovine infectious abortion: a systematic review and meta-analysis." *Frontiers in veterinary science* 10: 1249410.
- Hélias, Arnaud, P-S Mirade, and Georges Corrieu. 2007. "Modeling of Camembert-type cheese mass loss in a ripening chamber: Main biological and physical phenomena." *Journal of Dairy Science* 90 (11): 5324-5333.
- Holschbach, Chelsea L, and Simon F Peek. 2018. "Salmonella in dairy cattle." *Veterinary Clinics: Food Animal Practice* 34 (1): 133-154.
- Idele. 2023. *Résultats de contrôle laitier des espèces bovine, caprine et ovine. France 2022*. <https://idele.fr/detail-article/resultats-de-controle-laitier-france-2022>.
- ISO. 2019. *ISO 20976-1:2019 Microbiology of the food chain — Requirements and guidelines for conducting challenge tests of food and feed products*.
- Izquierdo, Esther, Eric Marchioni, Dalal Aoude-Werner, Claude Hasselmann, and Saïd Ennahar. 2009. "Smearing of soft cheese with *Enterococcus faecium* WHE 81, a multi-bacteriocin producer, against *Listeria monocytogenes*." *Food Microbiology* 26 (1): 16-20.
- Jones, Gabrielle, Patricia Mariani-Kurkdjian, Aurélie Cointe, Stéphane Bonacorsi, Sophie Lefèvre, François-Xavier Weill, and Yann Le Strat. 2023. "Sporadic Shiga Toxin-Producing *Escherichia coli*-Associated Pediatric Hemolytic Uremic Syndrome, France, 2012–2021." *Emerging Infectious Diseases* 29 (10): 2054.
- Jordan, D, Liza Rosenbaum Nielsen, and LD Warnick. 2008. "Modelling a national programme for the control of foodborne pathogens in livestock: the case of *Salmonella* Dublin in the Danish cattle industry." *Epidemiology & Infection* 136 (11): 1521-1536.
- Kempf, Florent, Roberto La Ragione, Barbara Chirullo, Catherine Schouler, and Philippe Velge. 2022. "Super shedding in enteric pathogens: a review." *Microorganisms* 10 (11): 2101.
- Kostakioti, Maria, Maria Hadjifrangiskou, and Scott J Hultgren. 2013. "Bacterial biofilms: development, dispersal, and therapeutic strategies in the dawn of the postantibiotic era." *Cold Spring Harbor perspectives in medicine* 3 (4): a010306.
- Kuhnert, Peter, Christoph R Dubosson, Markus Roesch, Esther Homfeld, Marcus G Doherr, and Jürg W Blum. 2005. "Prevalence and risk-factor analysis of Shiga toxigenic *Escherichia coli* in faecal samples of organically and conventionally farmed dairy cattle." *Veterinary Microbiology* 109 (1-2): 37-45.

- Latorre, Alejandra A, Jo Ann S Van Kessel, Jeffrey S Karns, Michael J Zurkowski, Abani K Pradhan, Kathryn J Boor, Evin Adolph, Sharinne Sukhnandan, and Ynte H Schukken. 2011. "Increased in vitro adherence and on-farm persistence of predominant and persistent *Listeria monocytogenes* strains in the milking system." *Applied and environmental microbiology* 77 (11): 3676-3684.
- Leclercq, A., C. Charlier, M. M. Maury, and M. Lecuit. 2019. *Rapport annuel d'activité du Centre national de Référence des Listeria – Année 2018*.
- Leclercq, A., Alexandra Moura, Caroline Charlier, and M. Lecuit. 2024. *Rapport annuel d'activité du Centre national de Référence Listeria – Année 2023. Institut Pasteur, Paris, France*.
- Lengagne, Laure. 2019. "Analyse du coût de renouvellement en élevage bovin lait : Analyse du renouvellement et de la carrière des vaches laitières, coût de reproduction des génisses et identification de marges de progrès." Chambre d'agriculture du Nord-Pas-de-Calais, 56 avenue Roger Salengro, 62051 Saint-Laurent-Blangy. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02649011>.
- Lim, Ji Youn, Haiqing Sheng, Keun Seok Seo, Yong Ho Park, and Carolyn J Hovde. 2007. "Characterization of an *Escherichia coli* O157: H7 plasmid O157 deletion mutant and its survival and persistence in cattle." *Applied and environmental microbiology* 73 (7): 2037-2047.
- Losinger, W. C., S. J. Wells, L. P. Garber, H. S. Hurd, and L. A. Thomas. 1995. "Management Factors Related to *Salmonella* Shedding by Dairy Heifers." *Journal of Dairy Science* 78 (11): 2464-2472. [https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(95\)76874-6](https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(95)76874-6).
- Mafart, Pierre, Olivier Couvert, Stéphane Gaillard, and Ivan Leguérinel. 2002. "On calculating sterility in thermal preservation methods: application of the Weibull frequency distribution model." *International journal of food microbiology* 72 (1-2): 107-113.
- Marchello, Christian S, Megan Birkhold, John A Crump, Laura B Martin, Michael O Ansah, Gianluca Bregghi, Rocio Canals, Fabio Fiorino, Melita A Gordon, and Jong-Hoon Kim. 2022. "Complications and mortality of non-typhoidal salmonella invasive disease: a global systematic review and meta-analysis." *The Lancet Infectious Diseases* 22 (5): 692-705.
- Maury, Mylène M., Yu-Huan Tsai, Caroline Charlier, Marie Touchon, Viviane Chenal-Francisque, Alexandre Leclercq, Alexis Criscuolo, Charlotte Gaultier, Sophie Roussel, Anne Brisabois, Olivier Disson, Eduardo P. C. Rocha, Sylvain Brisse, and Marc Lecuit. 2016. "Uncovering *Listeria monocytogenes* hypervirulence by harnessing its biodiversity." *Nature Genetics* 48 (3): 308-313. <https://doi.org/10.1038/ng.3501>.
- Mellado, M, JM Flores, A De Santiago, FG Veliz, U Macías-Cruz, L Avendaño-Reyes, and JE García. 2016. "Extended lactation in high-yielding Holstein cows: Characterization of milk yield and risk factors for lactations > 450 days." *Livestock Science* 189: 50-55.
- Miszczynska, S. D., N. Bel, P. Gay-Perret, V. Michel, M. C. Montel, and D. Sergentet-Thevenot. 2016. "Behavior of different Shiga toxin-producing *Escherichia coli* serotypes (O26:H11, O103:H2, O145:H28, O157:H7) during the manufacture, ripening, and storage of a white mold cheese." *Journal of Dairy Science* 99 (7): 5224-5229. <https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2015-10803>.
- Miszczynska, Stéphane D, Frédérique Perrin, Sarah Ganet, Emmanuel Jamet, Fanny Tenenhaus-Aziza, Marie-Christine Montel, and Delphine Thevenot-Sergentet. 2013. "Behavior of different Shiga toxin-producing *Escherichia coli* serotypes in various experimentally contaminated raw-milk cheeses." *Applied and environmental microbiology* 79 (1): 150-158.
- Møller Nielsen, Eva, Jonas T Björkman, Kristoffer Kiil, Kathie Grant, Tim Dallman, Anais Painset, Corinne Amar, Sophie Roussel, Laurent Guillier, Benjamin Félix, O. Rotariu, F. Perez-Reche, K. Forbes, and N. Strachan. 2017. "Closing gaps for performing a risk assessment on *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat (RTE) foods: activity 3, the

comparison of isolates from different compartments along the food chain, and from humans using whole genome sequencing (WGS) analysis." *EFSA Supporting Publications* 14 (2).

Murphy, Brenda P, Evonne McCabe, Mary Murphy, James F Buckley, Dan Crowley, Séamus Fanning, and Geraldine Duffy. 2016. "Longitudinal study of two Irish dairy herds: low numbers of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* O157 and O26 super-shedders identified." *Frontiers in Microbiology* 7: 1850.

Nielsen, Eva Møller, Jonas T. Björkman, Kristoffer Kiil, Kathie Grant, Tim Dallman, Anaïs Painset, Corinne Amar, Sophie Roussel, Laurent Guillier, Benjamin Félix, Ovidiu Rotariu, Francisco Perez-Reche, Ken Forbes, and Norval Strachan. 2017. "Closing gaps for performing a risk assessment on *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat (RTE) foods: activity 3, the comparison of isolates from different compartments along the food chain, and from humans using whole genome sequencing (WGS) analysis." *EFSA Supporting Publications* 14 (2): 1151E. <https://doi.org/https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2017.EN-1151>.

Nielsen, Liza Rosenbaum, and Søren Saxmose Nielsen. 2012. "A structured approach to control of *Salmonella* Dublin in 10 Danish dairy herds based on risk scoring and test-and-manage procedures." *Food Research International* 45 (2): 1158-1165. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.027>.

Nielsen, Liza Rosenbaum, YH Schukken, YT Gröhn, and Annette Kjær Ersbøll. 2004. "*Salmonella* Dublin infection in dairy cattle: risk factors for becoming a carrier." *Preventive veterinary medicine* 65 (1-2): 47-62.

Nielsen, TD, LR Nielsen, Nils Toft, and H Houe. 2010. "Association between bulk-tank milk *Salmonella* antibody level and high calf mortality in Danish dairy herds." *Journal of Dairy Science* 93 (1): 304-310.

Nielsen, Torben Dahl, IL Vesterbæk, AB Kudahl, KJ Borup, and LR Nielsen. 2012. "Effect of management on prevention of *Salmonella* Dublin exposure of calves during a one-year control programme in 84 Danish dairy herds." *Preventive veterinary medicine* 105 (1-2): 101-109.

O'sullivan, L, EB O'connor, RP Ross, and C Hill. 2006. "Evaluation of live-culture-producing lacticin 3147 as a treatment for the control of *Listeria monocytogenes* on the surface of smear-ripened cheese." *Journal of Applied Microbiology* 100 (1): 135-143.

Ohta, Naomi, Bo Norby, Guy H Loneragan, Javier Vinasco, Henk C den Bakker, Sara D Lawhon, Keri N Norman, and Harvey M Scott. 2019. "Quantitative dynamics of *Salmonella* and *E. coli* in feces of feedlot cattle treated with ceftiofur and chlortetracycline." *PLoS One* 14 (12): e0225697.

Papić, B., Majda Golob, Darja Kušar, Mateja Pate, and Irena Zdovc. 2019. "Source tracking on a dairy farm reveals a high occurrence of subclinical mastitis due to hypervirulent *Listeria monocytogenes* clonal complexes." *Journal of applied microbiology* 127 (5): 1349-1361.

Perrin, Frédérique, Fanny Tenenhaus-Aziza, Valérie Michel, Stéphane Miszczycza, Nadège Bel, and Moez Sanaa. 2015. "Quantitative risk assessment of haemolytic and uremic syndrome linked to O157: H7 and Non-O157: H7 shiga-toxin producing *Escherichia coli* strains in raw milk soft cheeses." *Risk Analysis* 35 (1): 109-128.

Plateforme de Surveillance de la Chaîne Alimentaire. 2022. *Surveiller STEC HP en filière de fabrication de fromages au lait cru. Document d'aide méthodologique.* https://www.plateforme-sca.fr/sites/default/files/2022-02/Guide_Stec_Vf.pdf.

Pomiès, Dominique, Caroline Constancis, Julien Jurquet, Isabelle Veissier, Hugues Caillat, Gilles Lagriffoul, Marie Drouet, Clément Fossaert, and Yannick Le Cozler. 2023. "Devenir des jeunes ruminants laitiers : comment concilier élevage et attentes sociétales." *INRAE Productions Animales* 36 (1): 13 p. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2023.36.1.7491>.

- Pouillot, R., K. Hoelzer, Y. Chen, and S B Dennis. 2015. "Listeria monocytogenes dose response revisited—incorporating adjustments for variability in strain virulence and host susceptibility." *Risk Analysis* 35 (1): 90-108.
- Pouillot, R., Andreas Kiermeier, Laurent Guillier, Vasco Cadavez, and Moez Sanaa. 2024. "Updated parameters for Listeria monocytogenes dose-response model considering pathogen virulence and age and sex of consumer." *Foods* 13 (5): 751.
- Pouillot, Régis, and Marie Laure Delignette-Muller. 2010. "Evaluating variability and uncertainty separately in microbial quantitative risk assessment using two R packages." *International Journal of Food Microbiology* 142 (3): 330-340. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.07.011>.
- Ratkowsky, D.A. 2003. "Model fitting and uncertainty." In *Modelling microbial responses in food*, edited by R.C. McKellar and X. Lu. CRC press.
- Redondo, Hernán G., Laurent Guillier, Virginie Desvignes, Matthias Filter, Sara M. Pires, and Maarten Nauta. 2025. "Quantitative microbiological risk assessment using individual data on food storage and consumption (Part 1): A case study on listeriosis associated to ready-to-eat foods in France." *Microbial Risk Analysis* 29: 100343. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mran.2025.100343>.
- Rice, Daniel H, Haiqing Q Sheng, Stacey A Wynia, and Carolyn J Hovde. 2003. "Rectoanal mucosal swab culture is more sensitive than fecal culture and distinguishes Escherichia coli O157: H7-colonized cattle and those transiently shedding the same organism." *Journal of clinical microbiology* 41 (11): 4924-4929.
- Robinson, SE. 2004. "Temporal characteristics of shedding of *Escherichia coli* in UK dairy cattle." *PhD., University of Liverpool.*
- Rodriguez, Cristina, Bernard Taminiau, E García-Fuentes, Georges Daube, and N Korsak. 2021. "Listeria monocytogenes dissemination in farming and primary production: Sources, shedding and control measures." *Food Control* 120: 107540.
- Rodriguez de Souza, Carolina Rosa, Hélène Bergis, Patricia Ng, Laurent Guillier, Benjamin Félix, Alexandre Leclercq, and Nathalie Gnanou-Besse. 2023. "Assessment of the relationship between the MLST genetic diversity of *Listeria monocytogenes* and growth under selective and non-selective conditions." *Food Microbiology* 114: 104303.
- Roguet, C. 2024. "Identification of the main risk factors and means of management of contamination of raw milk cattle farms by *Salmonella* spp., and testimonials from cases encountered in the savoie between 2018 et 2023." <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04659647>.
- Rukambile, Elpidius, Vitali Sintchenko, Gary Muscatello, Richard Kock, and Robyn Alders. 2019. "Infection, colonization and shedding of *Campylobacter* and *Salmonella* in animals and their contribution to human disease: A review." *Zoonoses and public health* 66 (6): 562-578.
- Ruzante, J. M., J. E. Lombard, B. Wagner, C. P. Fossler, J. S. Karns, J. A. S. Van Kessel, and I. A. Gardner. 2010. "Factors Associated with *Salmonella* Presence in Environmental Samples and Bulk Tank Milk from US Dairies." *Zoonoses and Public Health* 57 (7-8): e217-e225. <https://doi.org/10.1111/j.1863-2378.2010.01333.x>.
- Sanaa, M, B Poutrel, JL Menard, and F Serieys. 1993. "Risk factors associated with contamination of raw milk by *Listeria monocytogenes* in dairy farms." *Journal of Dairy Science* 76 (10): 2891-2898.
- Sanaa, Moez, Louis Coroller, and Olivier Cerf. 2004. "Risk Assessment of Listeriosis Linked to the Consumption of Two Soft Cheeses Made from Raw Milk: Camembert of Normandy and Brie of Meaux." *Risk Analysis* 24 (2): 389-399. <https://doi.org/10.1111/j.0272-4332.2004.00440.x>.
- Schoder, Dagmar, Alexandra Pelz, and Peter Paulsen. 2023. "Transmission Scenarios of *Listeria monocytogenes* on Small Ruminant On-Farm Dairies." *Foods* 12 (2): 265.

- Smith, David, Mark Blackford, Spring Younts, Rodney Moxley, Jeff Gray, Laura Hungerford, Todd Milton, and Terry Klopfenstein. 2001. "Ecological relationships between the prevalence of cattle shedding *Escherichia coli* O157: H7 and characteristics of the cattle or conditions of the feedlot pen." *Journal of Food Protection* 64 (12): 1899-1903.
- Stephens, TP, TA McAllister, and K Stanford. 2009. "Perineal swabs reveal effect of super shedders on the transmission of *Escherichia coli* O157: H7 in commercial feedlots." *Journal of animal science* 87 (12): 4151-4160.
- Strachan, Norval JC, Michael P Doyle, Fumiko Kasuga, Ovidiu Rotariu, and Iain D Ogden. 2005. "Dose response modelling of *Escherichia coli* O157 incorporating data from foodborne and environmental outbreaks." *International Journal of Food Microbiology* 103 (1): 35-47.
- Strickland, Ali J, Fernando Sampedro, and Craig W Hedberg. 2023. "Quantitative risk assessment of salmonella in ground beef products and the resulting impact of risk mitigation strategies on public health." *Journal of food protection* 86 (6): 100093.
- Tenenhaus-Aziza, Fanny, Jean-Jacques Daudin, Alexandre Maffre, and Moez Sanaa. 2014. "Risk-based approach for microbiological food safety management in the dairy industry: the case of *Listeria monocytogenes* in soft cheese made from pasteurized milk." *Risk Analysis* 34 (1): 56-74.
- Teunis, Peter FM. 2022. "Dose response for *Salmonella Typhimurium* and *Enteritidis* and other nontyphoid enteric salmonellae." *Epidemics* 41: 100653.
- Teunis, Peter FM, Fumiko Kasuga, Aamir Fazil, Iain D Ogden, Ovidiu Rotariu, and Norval JC Strachan. 2010. "Dose-response modeling of *Salmonella* using outbreak data." *International journal of food microbiology* 144 (2): 243-249.
- Teunis, PFM, ID Ogden, and NJC Strachan. 2008. "Hierarchical dose response of *E. coli* O157: H7 from human outbreaks incorporating heterogeneity in exposure." *Epidemiology & Infection* 136 (6): 761-770.
- Tourdjman, M., É. Laurent, and Al. Leclercq. 2014. "Listérioze humaine: une zoonose d'origine alimentaire." *Revue francophone des laboratoires* 2014 (464): 37-44.
- van Cauteren, D, Yann Le Strat, C. Sommen, M. Bruyand, M. Tourdjman, N. Jourdan Da Silva, E. Couturier, N. Fournet, H. De Valk, and J.-C. Desenclos. 2018. "Estimation de la morbidité et de la mortalité liées aux infections d'origine alimentaire en France métropolitaine, 2008-2013." *Bull Epidémiol Hebd* 1: 2-10.
- Van Cauteren, Dieter, Yann Le Strat, Cécile Sommen, Mathias Bruyand, Mathieu Tourdjman, Nathalie Jourdan Da Silva, Elisabeth Couturier, Nelly Fournet, Henriette de Valk, and Jean-Claude Desenclos. 2017. "Estimated annual numbers of foodborne pathogen-associated illnesses, hospitalizations, and deaths, France, 2008–2013." *Emerging infectious diseases* 23 (9): 1486.
- Vilar, M. J., E. Yus, M. L. Sanjuán, F. J. Diéguez, and J. L. Rodríguez-Otero. 2007. "Prevalence of and Risk Factors for *Listeria* Species on Dairy Farms." *Journal of Dairy Science* 90 (11): 5083-5088. <https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2007-0213>.
- WHO. 2002. *Risk assessments of *Salmonella* in eggs and broiler chickens*. Vol. 2. Food & Agriculture Org.
- Williams, KJ, MP Ward, OP Dhungyel, and EJS Hall. 2015. "Risk factors for *Escherichia coli* O157 shedding and super-shedding by dairy heifers at pasture." *Epidemiology & Infection* 143 (5): 1004-1015.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

2019-SA-0033



COURRIER ARRIVE

25 FEV. 2019

DIRECTION GENERALE

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION

Direction générale de l'alimentation
 Service de l'alimentation
 Sous-direction de la sécurité sanitaire des aliments
 Bureau des établissements de transformation et de distribution
 251 rue de Vaugirard
 75732 Paris cedex 15

Dossier suivi par : Matthieu MOURER
 Tél. : 01 49 55 84 94
 Fax : 01 49 55 56 80
 Mél : betd.sdssa.dgal@agriculture.gouv.fr
 Réf. : 2018-11-02 Projet saisine Lait cru globale v2.odt

B-0932

Le Directeur Général de l'Alimentation

à

Monsieur Roger Genet
 Directeur Général
 Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail
 27-31, avenue du Général Leclerc
 B.P. 19
 94701 MAISONS ALFORT CEDEX

Paris, le 22 FEV. 2019

Objet : Demande d'avis de l'ANSES sur les modalités de maîtrise du risque lié à la présence d'Entérobactéries dans les fromages au lait cru

Éléments de contexte et données utiles :

L'avis de l'EFSA daté du 13 janvier 2015 et relatif aux risques pour la santé publique en lien avec la consommation de lait cru liquide¹ identifie les principaux risques associés à cette pratique. Parmi eux, les bactéries *Salmonella spp* et *EHEC* figurent parmi les 6 risques majeurs identifiés et peuvent être portées par les animaux laitiers sans que ces derniers ne présentent de symptômes.

1 Préalable :

Les données figurant dans cet avis (p. 24) sont-elles représentatives de la situation en France pour l'ensemble des produits laitiers fabriqués avec du lait cru ?

D'autres risques devraient-ils être pris en compte, notamment *Campylobacter spp* ?

2 État des lieux des connaissances

Réaliser un état des lieux des connaissances relatives aux sources de contamination en bactéries pathogènes visées par la présente saisine, aux mesures de maîtrise et à leur efficacité dans les trois principales filières laitières (bovins, ovins, caprins) et notamment dans les contextes suivants :

- au stade de l'élevage, en distinguant les différentes conditions d'élevage (pacage, stabulation, ...);
- au stade de la traite, en s'interrogeant, entre autres, sur l'intérêt d'utiliser un filtre à cellules compatible avec l'arrêté ministériel du 9 novembre 2012 ;
- au stade de la collecte, en s'interrogeant sur les conséquences d'un refroidissement seulement partiel du lait (jusqu'à 18°C pendant 30 h pour le Morbier, transport en citerne non isotherme au sens de l'accord ATP, ...);
- au stade de la transformation en fromage, en distinguant les grands types de technologies

¹ EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ) – Scientific Opinion on the public health risks related to the consumption of raw drinking milk – EFSA journal 2015;13(1):3940

fromagères (pâtes molles, pâtes pressées non cuites, pâtes pressées cuites, pâtes persillées) ainsi que les autres produits susceptibles d'être fabriqués avec du lait cru (beurre, crème) ; les principales étapes de ces process (maturation du lait, caillage, chauffage du caillé, ...) seront, dans la mesure du possible, étudiés ; une attention particulière pour celles qui sont susceptibles de propager une contamination vers de nombreux autres lots (saumurage, affinage en cave) ;

- au stade de la distribution et de la consommation, selon les conditions de conservation des produits (respect de la chaîne du froid, nombre de jours de DLC, ...).

3 Évaluation quantitative du risque

En fonction des données disponibles sur la prévalence et la pathogénicité des différentes bactéries visées par cette saisine, évaluer l'impact des principales mesures décrites dans la deuxième partie sur la réduction du risque pour le consommateur final et proposer une hiérarchisation des mesures de maîtrise selon leur efficacité.

Évaluer la réduction du risque cumulée, de la fourche à la fourchette, pour les principaux types de produits fabriqués avec du lait cru.

Sur quelles concentrations en bactéries ces modèles mathématiques sont-ils construits ? Comment ces valeurs se situent-elles au regard des relations dose-réponse des différentes bactéries visées par la présente saisine ? Comment les conclusions des modèles pourraient-elles être impactées en cas de contamination à un niveau inférieur à leur domaine de validité ?

4 Méthodes d'analyse disponibles sur le marché

Rappeler les caractéristiques et les performances des principales méthodes d'analyses des souches visées par la présente saisine, depuis l'analyse des fèces jusqu'à celle des produits finis et cela pour les trois espèces laitières. Comparer les limites de détection de ces méthodes aux relations dose-réponse des différentes bactéries visées par la présente saisine.

Pour chacune, préciser dans quelles conditions plusieurs échantillons de produits peuvent être poolés, c'est-à-dire regroupés pour ne faire l'objet que d'une seule analyse, sur une masse supérieure à 25 g ?

De même, préciser dans quelles conditions un pré-traitement des échantillons (ajout de préasure, caillage, fermentation, maturation de l'échantillon, ...) peut améliorer la performance de l'analyse.

Existe-t-il des tests rapides de la présence de bactéries pathogènes sur le modèle de ceux utilisés pour la détection de résidus d'antibiotiques ? Quelles sont leurs conditions d'utilisation et leurs performances ?

5 Échantillonnage

Compte tenu des caractéristiques des méthodes d'analyse détaillées au point 4, à quel stade analyser les produits intermédiaires ou finis pour obtenir les résultats les plus fiables ? Comment expliquer des résultats apparemment incohérents au fil du process (par exemple, des résultats non-conformes sur un filtre à lait mais tous les échantillons de fromages fabriqués avec ce lait conformes) ?

Quelles concentrations de bactéries peuvent être détectées avec les plans d'échantillonnage systématiques suivants, sachant que chaque échantillon est prélevé dans un fromage différent du lot :

	Définition des lots			
	Tank de 10 000 L de lait et fromages de 250 g (Camembert)	Tank de 10 000 L de lait et fromages de 3 kg (Roquefort)	Tank de 50 000 L de lait et fromages de 250 g (Camembert)	Tank de 50 000 L de lait et fromages de 3 kg (Roquefort)
n=1x25g				
n=1x50g				

n=2x25g				
n=5x25g				
n=10x25g				
n=15x25g				
n=20x25g				
n=25x25g				
n=30x25g				

Inversement, quels plans d'échantillonnage systématiques devraient être mis en œuvre pour détecter des niveaux de concentration dans les produits finis de 100, 10, 1, 0,1, et 0,01 UFC/g et pour les valeurs de concentrations évoquées au point 3 (domaine de validité des modèles mathématiques et relations dose-réponse) ?

Comment les connaissances relatives à la périodicité de l'épisode de contamination des animaux peuvent-elles guider la planification d'un plan d'échantillonnage qui ne serait pas systématique (1 lot prélevé par semaine, 1 lot prélevé par mois, ...) ? Comment cette fréquence agit-elle sur la performance globale du plan d'échantillonnage ?

6 En termes de sortie de crise

Réaliser un état des connaissances relatives à la durée d'un épisode de contamination par les différentes bactéries visées par la présente saisine et à l'intérêt de maintenir dans le temps un plan d'autocontrôle renforcé après la reprise d'activité de l'établissement.

7 Pistes de recherche

Identifier les pistes de recherche prioritaires pour améliorer la maîtrise des risques évoqués ici.

Délai de réponse :

Une réponse **sous 18 mois** serait très appréciée.

Mes services se tiennent à votre disposition pour vous apporter toute information complémentaire.
Je vous remercie de bien vouloir accuser réception de la présente demande.

Le Directeur Général de l'Alimentation,
Patrick DEHAUMONT

Destinataires pour la réponse mail :

Destinataires DGAL :

- boîte institutionnelle du bureau métier : btd.sdssa.dgal@agriculture.gouv.fr
- chargé(e) de mission responsable du dossier : matthieu.mourer@agriculture.gouv.fr
- boîte institutionnelle saisines-anse.saisines-dgal@agriculture.gouv.fr

Annexe 2 : Sélection des articles

Sélection des articles concernant les mesures de maîtrise en production primaire

L'exploration bibliographique des mesures de maîtrise en production primaire a été réalisée dans quatre bases de données différentes : PubMed, Scopus, CABAbstract et WebOfScience²⁵. Les requêtes ont été construites de manière identique, mais séparées par micro-organismes.

1. Les quatre requêtes pour *Listeria* sont présentées ci-dessous. Pour les deux autres micro-organismes, 'listeria' a été modifié par 'salmonella' ou 'escherichia'. Les doublons ont été supprimés.

- PubMed : **listeria** AND (dairy or milk) AND (control OR measure OR "risk factor*" OR intervention) AND (farm OR herd)
- Filtre: de 2019 à 2023
- Scopus : (TITLE-ABS-KEY (listeria*)) AND (TITLE-ABS-KEY(dairy OR dairies OR milk)) AND (TITLE-ABS-KEY (control* OR prevention OR measur* OR "risk factor*" OR interventi*)) AND (TITLE-ABS-KEY (farm* OR herd)) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2023) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2022) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019))
- CABAbstract : TX **listeria** AND TX ((dairy OR dairies OR milk)) AND TX ((control* OR prevention OR measur* OR "risk factor*" OR interventi*)) AND TX ((farm OR herd))
 - Requête tout champ, filtre: de 2019 à 2023
- WebOfScience : TS=(**listeria***) AND TS=(dairy OR dairies OR milk) AND TS=(control* OR prevention OR measur* OR "risk factor*" OR interventi*) AND TS=(farm* OR herd) AND PY=(2023 OR 2022 OR 2021 OR 2020 OR 2019)

2. Un filtre de sélection « danger » a été ajouté avec la recherche de termes spécifiques dans le titre, résumé ou mot clef. Les mots-clef sont :

- Pour *Listeria* : « monocytogenes »
- Pour *Escherichia* : « STEC » « VTEC » « stx » « shiga* » « EHEC » « O157 » « O26 » « O157 » « O103 » « O111 » « O145 » « O45 » ou « O121 »
- Pas de filtre supplémentaire pour *Salmonella*

3. La pertinence des études a été explorée, vérifiant le périmètre des publications après lecture des résumés et avec les critères d'exclusion suivants : le micro-organisme était différent de la requête initiale, l'espèce animale était différente de bovin, chèvre ou brebis ; l'étude ne se déroulait pas à la ferme. Les publications pertinentes ont ensuite été lues et expertisées selon les filtres de sélection présentés en 3 . « Mesures de maîtrise considérées dans le modèle ».

Le Tableau A2.1 synthétise le nombre de références à chacune des trois étapes précédemment décrites.

Tableau A2.1 : Nombre de références retenues aux différentes étapes permettant la sélection des articles en production primaire

Danger microbiologique	1. Nombre de références uniques trouvées	2. Nombre de références après filtre de danger	3. Nombre de références « pertinentes » pour relecture experte

²⁵ Avec l'abonnement des journaux de l'INRAE en avril 2023

<i>Listeria</i>	102	72	58
<i>Salmonella</i>	220	220	140
<i>Escherichia</i>	747	90	55

Sélection des articles concernant les mesures pendant la fabrication

L'exploration bibliographique des mesures de maîtrise en production primaire a été réalisée dans quatre bases de données différentes : PubMed, Scopus, CABAbstract et WebOfScience²⁶.

1. Les requêtes ont été construites de manière identique, mais dont la technologie fromagère diffère. L'exemple présenté concerne les **fromages pâtes molles**. Les exemples de fromages listés sont les fromages AOP français.

- **Pubmed** : (surviv* or grow* or behav* or evolution or fate or kinet* or challenge-test*) AND (Listeria* or Escherichia* or salmonella*) AND ("soft cheese*" OR soft-cheese* OR "smear" OR "smear-surface" OR "washed-rind cheese*" OR "washed rind" OR camembert OR brie OR chaources OR neuchatel OR livarot OR epoisses OR langres OR maroilles OR munster OR "mont d'or")
 - Filtre: de 2019 à 2023
- **Scopus** : (TITLE-ABS-KEY (surviv* OR grow* OR behav* OR evolution OR fate OR kinet* OR challenge-test*) AND TITLE-ABS-KEY ((listeria* OR escherichia* OR salmonella*)) AND TITLE-ABS-KEY (("soft cheese*" OR soft-cheese* OR "smear" OR "smear-surface" OR "washed-rind cheese*" OR "washed rind" OR camembert OR brie OR chaources OR neuchatel OR livarot OR epoisses OR langres OR maroilles OR munster OR "mont d'or")))) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2023) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2022) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019))
 - Filtre: de 2019 à 2023
- **CABAbstract** : TX (surviv* OR grow* OR behav* OR evolution OR fate OR kinet* OR challenge-test*) AND TX (listeria* OR escherichia* OR salmonella*) AND TX ("soft cheese*" OR soft-cheese* OR "smear" OR "smear-surface" OR "washed-rind cheese*" OR "washed rind" OR camembert OR brie OR chaources OR neuchatel OR livarot OR epoisses OR langres OR maroilles OR munster OR "mont d'or")
 - Filtre: de 2019 à 2023
- **Web Of Science** : TS=(surviv* or grow* or behav* or evolution or fate or kinet* or challenge-test*) AND TS=(Listeria* or Escherichia* or salmonella*) AND TS=("soft cheese*" OR soft-cheese* or "smear" OR "smear-surface" OR "washed-rind cheese*" OR "washed rind" OR camembert OR brie OR chaources OR neuchatel OR livarot OR epoisses OR langres OR maroilles OR munster OR "mont d'or") and PY=(2023 OR 2022 OR 2021 OR 2020 OR 2019)

La requête a également été réalisée pour les fromages à pâtes pressées non cuites où les mots-clefs en gras ont été remplacés par "raw semi-hard cheese*" OR "raw semihard cheese*" OR "raw pressed cheese*" OR "uncooked semi-hard cheese*" OR semi-hard OR "uncooked semihard cheese*" OR "uncooked pressed cheese*" OR reblochon OR saint-nectaire OR "tome de savoie" OR morbier OR "ossau iraty" OR cheddar OR cantal OR salers OR laguiole. Les doublons ont été supprimés.

2. Un filtre de sélection par micro-organisme a été ajouté avec la recherche de termes spécifiques à Listeria, Escherichia et Salmonella dans le titre, résumé ou mot clef.), incluant le filtre « danger » et les mêmes mots-clefs présentés dans l'étape 2 de la recherche bibliographique en production primaire.

²⁶ Avec l'abonnement des journaux de l'INRAE en avril 2023

3. La pertinence des études a été explorée, vérifiant le périmètre des publications après lecture des résumés et avec les critères d'exclusion suivants : le micro-organisme était différent de la requête initiale, l'espèce animale était différente de bovin, chèvre ou brebis ; l'étude ne se déroulait pas à l'étape de transformation ou dans des fromages. Les publications pertinentes ont ensuite été lues et expertisées selon les filtres de sélection présentés en 3 . « Mesures de maîtrise considérées dans le modèle ».

Le tableau A2.2 synthétise le nombre de référence à chacune des trois étapes précédemment décrites.

Tableau A2.2 Nombre de références retenues aux différentes étapes permettant la sélection des articles à la fabrication

Danger microbiologique	1. Nombre de références uniques trouvées	2. Nombre de références après filtre de danger	3. Nombre de références « pertinente » pour relecture experte
Fromages à pâtes molles	169	<i>Listeria</i> : 70 <i>Escherichia</i> : 27 <i>Salmonella</i> : 38	<i>Listeria</i> : 57 <i>Escherichia</i> : 12 <i>Salmonella</i> : 22
Fromages à pâtes pressées non cuites	36	<i>Listeria</i> : 19 <i>Escherichia</i> : 10 <i>Salmonella</i> : 8	<i>Listeria</i> : 18 <i>Escherichia</i> : 10 <i>Salmonella</i> : 8

Annexe 3 : Synthèse des mesures de maîtrise identifiées pour la production et la fabrication des fromages au lait cru

Afin de sélectionner les mesures de maîtrise à considérer dans la modélisation, le GT FALC2 a appliqué les filtres définis dans la méthodologie : seules les mesures associées à une quantification de leur efficacité, disposant d'un poids des preuves jugé « moyen » ou « élevé », et compatibles avec les systèmes de production et de transformation français, ont été retenues.

Le tableau ci-après rassemble ces mesures de maîtrise, répondant ainsi aux critères de sélection définis. Elles couvrent différents maillons de la chaîne alimentaire, depuis la production primaire jusqu'à la fabrication, et reposent sur des données scientifiques suffisantes pour envisager leur intégration dans un modèle quantitatif de risque.

L'ensemble des mesures de maîtrise identifiées, y compris celles qui n'ont pas été retenues à ce stade en raison d'un poids des preuves insuffisant ou d'une incompatibilité avec le contexte français, est disponible en accès libre sur Zenodo à l'adresse suivante : [lien Zenodo à insérer].

Tableau A3.1 Mesures de maîtrise sélectionnées pour la modélisation selon le poids des preuves

Pathogène	Compartiment(s)	Espèce animale	Danger	Facteur de risque	Que peut-on faire ?	Finalité de la mesure	Valeurs rapportées dans les études	Paramètre du modèle concerné	Référence bibliographique
STEC	Alimentation	Plusieurs	STEC (O157, O26)	Mauvaise conduite d'ensilage et d'enrangement	Respecter les bonnes pratiques d'ensilage/enrangement	Limiter la circulation des STEC	Pas de survie des STEC (O157, O26) si respect des BPF (acidification + anaérobiose)	Prévalence d'animaux excréteurs	Anses 2020; Avery, Moore et Hutchison 2004, Bach et al. 2002, Byrne et al. 2002; Dunière et al. 2011, Fenlon et al. 2000, Fenlon et Wilson 2000, Ogunade et al. 2017, Ogunade et al. 2016, Pedrosa et al. 2010
STEC	Hébergement des animaux	bovins	STEC (dont O157)	Propreté des locaux des exploitations	Nettoyage / hygiène des exploitations	Limiter la persistance des STEC	Réduction de 70% de la prévalence des <i>E. coli</i> O157	Prévalence d'animaux excréteurs	Polifroni et al. 2012; Fremaux et al. 2006;

							(sols non-boueux versus boueux).		Smith et al. 2001.
STEC	Hébergement des animaux	Plusieurs	STEC (dont O157)	Aires de couchage contaminées (conditions physico-chimiques propices à la multiplication des STEC).	Maîtrise de la qualité des litières (aires de couchage sèches et propres).	Limiter la persistance	Réduction de 30% de la prévalence de bouses positives pour E. coli O157	Prévalence d'animaux excréteurs	Adam & Brülsauer, 2010; Ellis-Iversen et al. 2008; Ellis-Iversen et al. 2007; Rapport Stecamont, 2019.
STEC	Gestion des animaux	Bovins (jeunes 3-18 mois)	STEC O157	Transmission des STEC entre animaux	Ne pas mélanger les animaux de groupes différents (ni introduire de nouveaux animaux porteurs).	Limiter la circulation des STEC	Réduction de 30% de la prévalence de bouses positives pour E. coli O157	Prévalence d'animaux excréteurs	Ellis-Iversen et al. 2008
STEC	Traite du lait	Plusieurs	E. coli	Contamination des trayons	Nettoyage de la peau des trayons	Réduire la contamination du lait au moment de la traite	Réduction de E. coli d'un facteur 2,4 à 6,3 selon les produits	Prévalence de lait contaminé	Rapport MalISTEC; EFSA Panel on Biological Hazards 2015
Listeria monocytogenes	Alimentation	Plusieurs		Mauvaise conduite d'ensilage et d'enrangement	Respecter les bonnes pratiques d'ensilage/enrangement	Limiter la circulation de L. monocytogenes	OR=6.9	Prévalence de L. monocytogenes dans le lait de tank	Sanaa et al. 1993
Listeria monocytogenes	Gestion des animaux	Plusieurs		Mammites subcliniques	Détection des mammites subcliniques	Limiter la prévalence de L. monocytogenes	" 9 of 47 (19,1%) dairy cows excreted L. monocytogenes with raw milk due to subclinical mastitis"	Prévalence de L. monocytogenes dans le lait de tank	Papic et al 2019
Listeria monocytogenes	Gestion des animaux	Plusieurs		Contamination des trayons/ Formation de biofilm sur les équipements	nettoyage de la peau des trayons/ hygiène des locaux/ hygiène du matériel	Réduire la contamination du lait au moment de la traite	nettoyage des trayons OR = 0.26/OR=2 .93/	Prévalence de L. monocytogenes dans le lait de tank	Hassan et al. 2001; Sanaa et 1993

Salmonella	Animaux	Bovins	Salmonella Dublin	Introduction de bovins dans l'élevage	Contrôler le portage de salmonelles sur les animaux à l'entrée dans la ferme	Limiter l'introduction	scenario 3: less frequent trading of cattle, smaller consignments of cattle during trading, and less high-risk trading --> national (median) herd prevalence at 10 years is predicted to be 0.1% (compared to 3.25% in the base scenario) scenario 4: bulk tank milk testing every 30d (instead of 90d in the base scenario): national median herd prevalence at 10 years reduced to 1.55%	Prévalence des troupeaux infectés	(Jordan et al. 2008)
Salmonella	#4. Logement, soins aux animaux (phase d'élevage)	Bovins	Salmonella	Zone de vêlage	Disposer d'une zone de vêlage dédiée	Limiter la circulation et la persistance	OR: 0.53 (0.283 to 0.987)	Prévalence de portage	(Losinger et al. 1995)
Salmonella	#6. Logement, soins aux animaux (phase de production)	Bovins	Salmonella Dublin	Hygiène dans les élevages	Entretien des stabulations	Limiter la circulation et la persistance	Risk factor for prevalence: No clean visitor parking area: OR: 2.86 (1.18-6.92)	Prévalence et incidence des fermes positives pour Salmonella	Davison 2006

							Risk factor for incidence: No clean visitor parking area:OR: 3.49 (1.37-8.92)		
Salmonella	#7. Traite	Bovins	Salmonella	Hygiène des trayons	Utilisation de lavettes individuelles	Réduction de la contamination du lait	“Workers wear latex or nitrile gloves during milking; p-value: 0.026 Operation uses automatic takeoffs during milking; p-value: 0.048 Milker training is performed ; p-value: 0.050”	Contamination du lait de tank	

Le tableau présente les mesures de maîtrise documentées lors de la fabrication des fromages au lait cru à pâte pressée non cuite (PPNC), issues de la revue de littérature conduite par le GT FALC2 selon la démarche PRISMA (2019-2023). Les mesures recensées concernent différents pathogènes (entérobactéries, *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*) et reposent sur des études quantitatives évaluant leur efficacité (inhibition, décroissance, réduction de charge).

Conformément à la méthodologie retenue, seules les mesures présentant un poids de preuves suffisant (« moyen » ou « élevé ») et jugées applicables aux conditions de fabrication françaises ont été intégrées dans cette synthèse.

Tableau A3.2 Synthèse des mesures de maîtrise applicables en fabrication des fromages

Fromage	Pathogène	Mesure	Impact	Résultats	Explication	Références	Applicabilité	Valeurs
PM	1-Entérobactéries	Compétition LAB	inhibition compétition LAB	reduction 3 log des entérobactéries avec l'utilisation de certaines	Action antagoniste des bactéries lactiques	Bassi 2020	oui	potentiel inhibition par les LAB

				bactéries lactiques				
PM	2-Salmonella	Durée de l'affinage	décroissance	décroissance 1 log par semaine si la température est inférieure ou égale à 8°C (T° défavorable, pH favorable, lipolyse)		Little and Knochel, 1994	oui	potentiel inactivation
PM	3-Listeria	Compétition LAB	inhibition compétition LAB	effet inhibiteurs des LAB sur la croissance Listeria dans les fromages pasteurisés et au lait cru	Baisse de pH, Listeria non compétitif par rapport aux LAB, Action antagoniste des bactéries lactiques	Ennahar 1994 ; Martinez-Rios 2020; Cadavez et al 2019 ; Imran et al 2013	oui	profils pH aw pour modèles entre cœur et surface, potentiel de croissance
PM	3-Listeria	Souches Bactériocines +	inhibition par souches productrices de bactériocines	production de différentes bactériocines par des LAB	activité des bactériocines sur la croissances Listeria	Ennahar 1998 ; Izquierdo 2009 ; Loessner 2003 ; O'sullivan 2006 ; Eppert 1997 ; Carnio 2000 ; Maisnier-patin 1992	oui	oui
PM	3-Listeria	Durée de l'affinage	croissance en surface	croissance en surface mais pas au cœur du fromage	pH remonte entre 5,5 et 7,5 à 30 jours d'affinage ; croissance rapide à 10 ou 15°C plus qu'à 3°C ou 6°C	Ennahar et al, 1994 ; Back et al 1994 ;Imran et al, 2013	oui	courbe de pH durant l'affinage en surface et au cœur
PPNC	1-EHEC	Cinétique pH, Compétition LAB	augmentation puis survie ou décroissance ; inhibition croissance par les LAB	augmentation de la population 1,5-2 log - inhibition de la croissance avec LAB / microbiote du lait cru	effet pH + bio preservation par un consortium inhibiteur - accélération de la diminution de pH -	Frétin et al 2020 ; Cosciani-cunico et al 2015 ; Miszczynska et al 2013	oui	profil pH aw et T

					impact de la composition des microbites du lait			
PPNC	1-EHEC	Durée d'affinage	inactivation	durée d'affinage de 60 jours permet de ne plus détecter le pathogène	Effet serotype : [O157:H7] < O26:H11, O103:H2, et O145:H28 en cœur et surface	Chon et al 2020 ; Miszczycza et al 2013	oui	évolution pH et aw
PPNC	2-Salmonella	Cinétique pH, compétition LAB	inhibition de croissance	Inactivation de Salmonella en présence de certaines souches LAB après affinage 22 jours à 22°C	pH, activités antimicrobiennes des LAB	Campagnolo et al 2020	oui	pH, potentiel croissance/inactivation
PPNC	3-Listeria	Cinétiques pH, Compétition LAB aux propriétés acifiantes et antimicrobiennes	inhibition de croissance	La cinétique de pH des PPNC permet de développement de Listeria - Inhibition par des LAB aux propriétés anti-Listeria	pH, activités antimicrobiennes des LAB, Interaction avec microbiote du lait cru	Campagnolo et al 2020 ; Gonzales-Barron et al 2020 ; Bovo et al 2018 ; Campagnolo et al 2018 ; Cherrat et al 2024 ; Wemmenhove et al 2012	oui	pH, potentiel croissance/inactivation
PPNC	3-Listeria	Durée d'affinage	survie ou croissance (premier jours) puis survie ou décroissance (affinage plus long)	plus la durée de l'affinage augmente au-delà des 8 jours plus les populations de Listeria décroissent - réduction plus rapide en lait cru par rapport au lait pasteurisé	pas de croissance si pH < 5.2 et [lactate] ~ 14 mg/g ; réduction pH et aw, augmentation NaCl, associés aux interactions avec les LAB autochtones ou ajoutées (peroxyde d'hydrogène, bacteriocines) ; effet du microbiote du lait cru	Millet et al 2006 ; Bovo et al 2018 ; Campagnolo et al 2018 ; Cosciani-cunico. 2015 ; Chon et al 2020 ; Chatelard-Chauvin et al 2015	oui	évolution pH et aw pendant l'affinage

PPNC	3-Listeria	Conservation après affinage	croissance	Fromages du commerce ensermentés après fabrication	croissance Listeria possible	Gerard et al 2020	oui	
------	------------	-----------------------------	------------	--	------------------------------	-------------------	-----	--

Annexe 4 : Description détaillée des modèles d'appréciation des risques

A4.1 Caractéristiques des fermes

Le modèle considère les productions de différentes fermes livrant leur lait à une entreprise de transformation. Le nombre de fermes livrant à l'entreprise est spécifique aux troupeaux bovins, (N_{farm_b}), caprins (N_{farm_c}) et ovins (N_{farm_o}). Les trois valeurs retenues pour le scenario de référence sont en adéquation avec les données disponibles pour les différents types de production de fromage. Concernant le nombre d'animaux (N_{cow} , N_{goat} , N_{ewe}), les valeurs moyennes d'animaux dans les fermes productrices française ont été retenues (Idele 2023).

Les animaux des troupeaux sont renouvelés régulièrement avec la mise à la réforme de certains animaux et l'introduction de nouveaux animaux (primipares du troupeau ou achat provenant de l'extérieur de la ferme). La valeur moyenne des taux de renouvellement annuel est de 34 % pour les bovins et les caprins, et de 24 % pour les ovins (Pomiès et al. 2023). Le nombre de lactations des animaux retenus dans le modèle est donc de trois pour les bovins et caprins, et de quatre pour les ovins.

Les données d'autocontrôle des laits de tanks pour le critère d'hygiène *E. coli* ont été utilisées pour définir différentes catégories de ferme. Une loi normale permet de caractériser la variabilité journalière des niveaux de contamination en *E. coli* exprimée en $\log_{10}(\text{ufc/mL})$ pour chacune des fermes ($N(\alpha, \sigma)$). La valeur de 50 ufc/mL est utilisée dans le cadre de la sélection des laits pouvant entrer en fabrication (Anses 2018b). La probabilité de dépasser la valeur de 50 ufc/mL diffère en fonction des fermes. La figure A4.1 présente la distribution de ces probabilités établie pour les données disponibles pour la filière bovine (Basak et al. 2023). Trois groupes de fermes peuvent être définis. Le groupe 3, associé aux fermes présentant un niveau d'hygiène insuffisant (probabilité d'observer des niveaux de concentration supérieurs à 50 ufc/mL > 0,12), représente 13,4 % des fermes dans le scénario de référence.

Les données de la littérature permettent de montrer que la conduite des ensilages dépend de la matière et des conditions de stockage, notamment l'acidification. La proportion des élevages ayant des difficultés de maîtrise des ensilages (proportion d'élevages avec des ensilages avec des pH supérieurs à 4,6) est estimée à 17,7 % (Vilar et al. 2007).

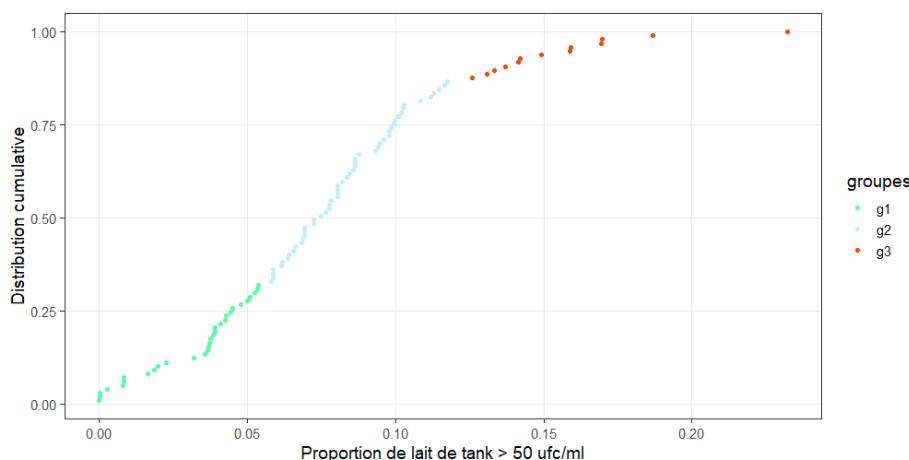


Figure A4.1. Répartition (pour 97 fermes bovines) des proportions des laits de tanks dépassant la concentration de 50 ufc/mL. La classification des fermes a été établie par la méthode des nuées dynamiques (k-moyennes).

Tableau A4.1. Synthèse des valeurs de paramètres pour les fermes dans le scénario de référence

Données d'entrée	Symbol	Valeur	Source
Nombre de fermes pour les bovins	N_farms_c	31 ^a	(Perrin et al. 2015)
Nombre de fermes pour les caprins	N_farms_g	67 ^a	Données CC
Nombre de fermes pour les ovins	N_farms_e	85 ^a	Données OI
Nombre de vaches par ferme	N_cow	66	(Idèle 2023)
Nombre de chèvres par ferme	N_goat	173	
Nombre de brebis par ferme	N_ewe	384	
Nombre de litres de lait par jour et par vache	q_milk_c	25	(Idèle 2023)
Nombre de litres de lait par jour et par chèvre	q_milk_g	3,1	
Nombre de litres de lait par jour et par brebis	q_milk_e	1,5	
Durée d'une lactation pour les vaches	d_lact_c	300	
Durée d'une lactation pour les chèvres	d_lact_g	300	
Durée d'une lactation pour les brebis	d_lact_e	300	
Paramètres caractérisant les distributions de niveaux d' <i>E. coli</i> des laits de tanks	alpha, sigma	97 paires de valeurs	(Basak et al. 2023)
Proportion de fermes avec un niveau d'hygiène insuffisant	p_hyg	0,134	Cet avis
Proportion de fermes ayant des difficultés défaut d'ensilage	p_silage	0,177	(Vilar et al. 2007)

^a le nombre de ferme est égale à 1 dans le cas de la production fermière

Tableau A4.2. Synthèse des valeurs de paramètres concernant le module ferme

Variable	Signification	Valeur	Valeur min	Valeur max	Référence
pSTECgl	Proportion de souches STEC stx2a2d dans les laits	0.33 (bovin) 0.165 (caprin) 0.05 (ovin)	0.264 0.15 0.04	0.396 0.18 0.06	(Delannoy, Tran, and Fach 2022)
p_STEC_I_III_topV	Prévalence observée de portage des animaux pour STEC des groupes I et III du top V	0.018	0.0084	0.0382	Bibbal et al (2015)
p_STEC_I_III_nontopV	Prévalence observée de portage des animaux pour STEC des groupes I et III n'appartenant pas top V	0.006	0.001	0.011	ANSES (2023)
p_undetect	Proportion d'animaux porteurs mais indetectable (LOD)	0.22			ANSES Rapport GT FALC2
p_STEC_II	Prévalence portage des animaux pour STEC du groupe II	0.0			ANSES Rapport GT FALC2

prop_O26	Proportion de souches O26 au sein des groupes I et III du top V	0.41	0.22	0.64	Delannoy et al. (2022) / données LNR transmises pour l'expertise STEC
prop_supershed	Proportion de supershedders (>104 ufc/g de féces)	0.0286	0.007	0.15	(Bibbal et al. 2022)
p_Salmonella	Probabilité globale de portage pour Salmonella	0.03	0.021	0.043	Bonifait et al. (2021)
prop_HV	Proportion de souches appartenant aux sérovars virulents	0.094 (PMCFb) 0.46 (PPNCb) 0.04 (PPNCo) 0.15 (PMCFc)	0.06	0.158	Données Réseau Salmonella 2025
prop_HV_Dublin	Proportion de souches Dublin parmi les hautement virulents	0.21 (PMCFb) 0.64 (PPNCCb)	0.061	0.396	Données Réseau Salmonella 2025
meanlog10_Salmonella	Moyenne du log10 des concentrations de Salmonella dans les matières fécales	0.72	0.21	1.21	ANSES Rapport GT FALC2
sdlog10_Salmonella	Écart-type du log10 des concentrations de Salmonella dans les matières fécales	1.3	1.0	1.47	ANSES Rapport GT FALC2
r_salmonellosis	Probabilité de salmonellose clinique	0.022			Cummings et al. (2010)
d_salmonellosis	Durée des symptômes de la salmonellose chez les bovins en jours	10.0			(Roguet 2024)
p_obs_Lm	Prévalence de Listeria monocytogenes dans les tanks des fermes	0.012			(Basak et al. 2024; Botsaris et al. 2016)
p_mammite	Proportion de contamination des tanks associée aux mammites subcliniques	0.1			Bemrah et al. 1998
Pr_hygsat	Probabilité que l'hygiène soit jugée satisfaisante	0.866			ANSES Rapport GT FALC2
Pr_alimsat	Probabilité que l'alimentation soit jugée satisfaisante	0.823			Vilar et al. 2007
Pr_equipement	Probabilité que les équipements de traite soient jugés satisfaisants	0.85	0.765	1.0	Littérature professionnelle (conformité référentiel Certitraite)
F_alim_STEC	Ratio de risque associé à l'alimentation (pour STEC)	4.84	2.94	7.94	(Kuhnert et al. 2005)
F_hyg_STEC	Ratio de risque associé à l'hygiène (pour STEC)	4.14	1.7	10.0	(Smith et al. 2001)
F_hyg_Salmonella	Ratio de risque associé à l'hygiène (pour Salmonella)	2.86	1.18	6.92	(H. Davison et al. 2006b)

F_hyg_Lm	Ratio de risque associé à l'hygiène (pour Listeria)	6.1	2.62	14.29	Sanaa et al. 1993
q_milk	Quantité de lait (q_milk)	25.0			Basak et al. 2024
N_days	Nombre de jours simulés	300.0			(Mellado et al. 2016)
ECfijd.mean	Moyenne du log10 des concentrations de <i>E. coli</i> dans les matières fécales	6.0			Perrin et al. (2015)
ECfijd.sd	Écart-type du log10 des concentrations de <i>E. coli</i> dans les matières fécales	0.3			Perrin et al. (2015)
sorting_freq	Période en jour entre deux analyses d' <i>E. coli</i> au niveau des laits de tanks	10. (300 dans le cas de la production fermière)			Anses (2018b)
sorting_lim	Limite en ufc/mL à partir de laquelle le lait des fermes est exclu de la production lait cru	50			Anses (2018b)
exclusionEColi	Nombre de jours d'exclusion suite à un résultat non satisfaisant pour le critère <i>E. coli</i>	1			Anses (2018b)

Tableau A4.3. Synthèse des valeurs de paramètres concernant le module « Fabrication »

Variable	Signification	Valeur	Valeur min	Valeur max	Référence
mu_max_T_min_stec	Valeurs cardinales STEC	5.5			Perrin et al., 2015
mu_max_T_opt_stec		40.6			
mu_max_T_max_stec		48.1			
mu_max_pH_min_stec		3.9			
mu_max_pH_opt_stec		6.25			
mu_max_pH_max_stec		14			
mu_max_aw_min_stec		0.9533			
mu_max_aw_opt_stec		0.999			
mu_max_mu_opt_stec	μ_{opt} modèle secondaire de STEC dans le lait et fromage (stade caillé) (h-1)	1.85			
mu_max_T_min_salmonella	Valeurs cardinales Salmonella	3.4			Gonzales-Barron et al. 2022
mu_max_T_opt_salmonella		38.5			
mu_max_T_max_salmonella		46			
mu_max_pH_min_salmonella		4			

mu_max_pH_opt_salmonella		7			
mu_max_pH_max_salmonella		9			
mu_max_aw_min_salmonella		0.94			
mu_max_aw_opt_salmonella		0.99			
mu_max_mu_opt_salmonella	μ_{opt} modèle secondaire de Salmonella dans le lait et fromage (stade caillé) (h-1)	1.02			
mu_max_T_min_listeria	Valeurs cardinales L. monocytogenes	-1.7			Gonzales-Barron et al. 2022
mu_max_T_opt_listeria		37			
mu_max_T_max_listeria		45.5			
mu_max_pH_min_listeria		4.71			
mu_max_pH_opt_listeria		7.1			
mu_max_pH_max_listeria		9.61			
mu_max_aw_min_listeria		0.913			
mu_max_aw_opt_listeria		0.997			
mu_max_mu_opt_listeria_I	μ_{opt} modèle secondaire de L. monocytogenes dans le lait et caillé (h-1)	0.55			
mu_max_mu_opt_listeria_c	μ_{opt} modèle secondaire de L. monocytogenes dans le fromage (h-1)	0.1725	1.30e-01	2.12e-01	(Augustin et al. 2005; FDA and Health Canada 2015; Moez Sanaa, Coroller, and Cerf 2004)
mafart_delta_core	Temps jusqu'à la première réduction de log10 – modèle Mafart-Weibull (zone cœur du fromage)	1.4548	1.41e+00	1.50e+00	Gonzales-Barron et al. 2022
mafart_p_core	Paramètre de forme du modèle Mafart-Weibull (zone cœur du fromage)	0.274			
mafart_delta_rind	Temps jusqu'à la première réduction de log10 – modèle Mafart-Weibull (zone croûte)	3.1	3.06e+00	3.14e+00	
mafart_p_rind	Paramètre de forme du modèle Mafart-Weibull (zone croûte du fromage)	2.7			
rind_core	Proportion du fromage associée à la croûte	0.097	8.73e-02	1.07e-01	FDA/Health Canada (2015)

rho_O26	Taux de décroissance des STEC pathogènes non O26 (gI, gII, gIII)	0.14	1.10e-01	1.70e-01	Perrin et al., 2015
rho_nonO26	Taux de décroissance des autres STEC O26 (gI, gIII)	0.033			Perrin et al., 2015
w_activity	Paramètre d'activité de l'eau pour la croissance initiale	0.99			Basak et al. 2024
w_activity_cheese	Paramètre d'activité de l'eau dans le fromage (pour Listeria monocytogenes)	0.975			(Hélias, Mirade, and Corrieu 2007)
y_max_milk	Population maximale hypothétique dans le lait (trois espèces)	10000000000			Basak et al. 2024
y_max_cheese	Population maximale hypothétique dans le fromage dans les caillé (trois espèces)	6.5e+06	6.0e+06	6.0e+07	
storage_duration	Durée par défaut de l'étape de stockage	12			
storage_temperature	Température par défaut pendant l'étape de stockage	5			
premolding_duration	Durée de l'étape de pré-moulage (h)	3			
premolding_pH_evol	pH en fonction du temps pendant le pré-moulage	function(t) 6.5 - 0.148 * t			
premolding_T_evol	Température en fonction du temps pendant le pré-moulage	function(t) 32			
draining_duration	Durée de l'étape d'égouttage (h)	17			
draining_pH_evol	pH en fonction du temps pendant l'égouttage	function(t) {ifelse(t <= 5, 6.06 - 0.246*t, ifelse(t <= 10, 5.08 - 0.050*t, 4.64 - 0.006*t))}			
draining_T_evol	Température en fonction du temps pendant l'égouttage	function(t) {ifelse(t <= 4, 32 - 5.459*t + 0.643*t^2, 20.46 - 0.197*t)}			
salting_duration	Durée de l'étape de salage (h)	4.5			
salting_pH_evol	pH en fonction du temps pendant le salage	function(t) 4.52			

salting_T_evol	Température en fonction du temps pendant le salage	function(t) {ifelse(t <= 2, 17.1 - 2.325*t, 12.45)}			
second_growth_pH_evol	pH quand les conditions de croissance redeviennent favorables pendant l'affinage (croûte) et le stockage (cœur)	function(t) 6			
second_growth_lag_core	Durée de phase sans croissance après début de l'affinage pour Listeria (zone cœur) (en jours)	20			
second_growth_lag_rind	Durée de phase sans croissance après début de l'affinage pour Listeria (zone croûte) (en jours)	10			FDA/Health Canada (2015)
consumption_time	Nombre de jours avant remise aux consommateurs	22			
salting_listeria	Inactivation suivant l'étape de salage (en log10)	1.5	1.00e+00	2.00e+00	
w_loss	Fraction de la contamination non évacuée par le lactoserum	0.55	2.00e-01	9.00e-01	
v_cheese	Volume de lait utilisée pour un fromage (mL)	2200			Basak et al. 2024
wt_cheese	Poids d'un fromage (g)	250			
m_sample	Quantité de fromage (g) analysée	25			
n_sample_entero	nombre d'échantillons pour STEC et Salmonella	1			
n_sample_Lm	nombre d'échantillons pour Listeria	5			
p_test	Proportion des lots testés	0.4			
d_test	Jour de fabrication auquel la recherche de STEC et Salmonella est réalisée	4			
d_test_lm	Jour de fabrication auquel la recherche de L. monocytogenes est réalisée	14			
r_reconta	Probabilité de recontamination des fromages en surface par L. monocytogenes	0.01			FDA/ Health Canada (2015) Tenenhaus et al
n_reconta	Nombre d'ufc transférées par fromage	51	1.10e+01	1.10e+02	(FDA and Health

					Canada 2015; Tenenhaus- Aziza et al. (2014)
--	--	--	--	--	---

Tableau A4.4. Synthèse des valeurs de paramètres concernant le module consommateur

Catégorie	Variable	Signification	Valeur / Distribution	Référence / Source
Conservation	min_conservation	Durée minimale de conservation (jours)	1	Perrin et al (2015)
Conservation	mode_conservation	Durée modale de conservation (jours)	9	
Conservation	max_conservation	Durée maximale de conservation (jours)	38	
Conservation	Températures réfrigérateurs	Distribution issue du fichier INCA3_temp.csv	voir fichier CSV	INCA3
Consommation	p_consorind	Proportion de consommateurs de croûte	0,84 (PMCF) 0,48 (PMCL) 0,27 (PPNCC)	INCA3
Consommation	Répartition population	Données de consommation par Âges / sexes	voir fichier Excel PMCF_consommation.xlsx	INCA3
Portions	nb_portions_par_fromage	Nombre de portions par fromage	6	Choix du GT
Portions	prop_seuls	Proportion de foyers composés d'1 personne	0,382	INSEE (2024)
Portions	prop_deux	Proportion de foyers composés de 2 personnes	0,3238	
Dose-réponse	kSTEC, r0	Paramètres dose-réponse STEC	-0.38 ; 10^-2.33	Perrin et al (2015)
Dose-réponse	DRLm,	Fonctions dose-réponse	voir script et package doserelation	Pouillot et al, (2024)
Dose-réponse	DRSalmonella	Paramètres de la dose-réponse Salmonella	voir fichier CSV Polynomial2.csv	(FSIS 2024)

Annexe 5 : Tableau des incertitudes selon la méthode du GT ACCMER

Volet de l'expertise	Origine (niveau 1)	Origine (niveau 2)	Description	Modalité de prise en compte	Impact de l'incertitude sur le résultat de l'expertise
1. Contexte de l'expertise	Contexte	Cadre de la demande	Les travaux du GT FALC2 s'appuient sur les résultats proposés par les experts du GT FALC1, dont les incertitudes sur le contexte sont explicités ci-après.	Tracées dans le rapport du GT FALC2	Impact non caractérisable.
1. Contexte de l'expertise	Contexte	Périmètre d'expertise	La question A1 de la saisine contraint l'expertise aux dangers bactériens. Les virus ou parasites ne sont pas inclus dans cette expertise.	Seuls des dangers bactériens sont pris en compte	Sous-estimation du risque pour l'ensemble des fromages produits au lait cru.
1. Contexte de l'expertise	Contexte	Périmètre d'expertise	La question A1 de la saisine contraint l'expertise aux produits laitiers fabriqués à partir de lait cru, alors que certaines situations explorées dans ce document sont aussi valables pour des produits laitiers produits à partir de lait pasteurisé (ex. Listeria),	Seuls les produits au lait cru sont considérés	Sous-estimation du risque au regard de la filière fromage dans son ensemble. A noter que certains leviers de maîtrise sont transférables à l'ensemble de la filière fromage.
1. Contexte de l'expertise	Contexte	Périmètre d'expertise	Question A1: Le périmètre de l'expertise précise les produits laitiers fabriqués "en France". Les données disponibles pour l'expertise sont majoritairement celle de la France hexagonale + la Corse.	Des spécificités liées à la production, à la transformation ou à la consommation dans les territoires ultramarins peuvent exister, sans être systématiquement prises en compte dans les sources de données exploitées. Ces dernières peuvent inclure des données issues de l'outre-mer de manière implicite. Ainsi, les spécificités ultramarines n'ont pas été explicitement considérées.	Sous-estimation des caractéristiques de production, de fabrication et de consommation des territoires ultramarins ; par contre l'impact sur le risque est difficile à évaluer.

1. Contexte de l'expertise	Contexte	Périmètre d'expertise	Question A1 : La saisine contraint l'expertise aux produits fabriqués en France, les produits importés ne sont pas pris en compte.	Le GT a considéré les volumes produits en France (incluant ceux exportés). Les produits similaires importés ne sont pas pris en compte.	Pour savoir précisément s'il y a sous ou sur estimation, il faudrait connaître la part relative d'exportation/importation de fromages au lait cru. A noter que certains leviers de maîtrise sont transférables aux fromages qu'ils soient importés ou produits en France, et que d'autres leviers de maîtrise auraient peut-être pu être explorés pour les fromages importés.
1. Contexte de l'expertise	Contexte	Périmètre d'expertise	La question A2 restreint l'expertise aux trois principales filières de production de produits au lait cru. Les connaissances disponibles concernent majoritairement les fromages sous AOP, tandis que les productions non AOP sont moins bien documentées. Par ailleurs, d'autres filières utilisant des laits différents (lait d'ânesse, de bufflonne) ne sont pas pleinement prises en compte dans l'analyse.	Le périmètre proposé dans la saisine a été conservé en utilisant plusieurs sources de données pour limiter les biais.	Impact sur l'évaluation du risque assez faible.
2. Introduction et en particulier 2.2 Approche retenue pour répondre aux actions A3 et A5.	Méthode	Exploitation des données d'entrée	La méthodologie suivie est celle préconisée par le Codex Alimentarius. La simulation de Monte Carlo a été utilisée car il n'était pas possible de générer les résultats de façon analytique.	La méthode de travail est décrite dans le texte (section 2.2) ; c'est une méthode reconnue et largement adopté dans la communauté scientifique et parmi les gestionnaires (le Codex Alimentarius fait autorité).	Impact sur l'évaluation du risque très faible sachant que les sorties seront interprétables par l'ensemble de la communauté scientifique et la majorité des gestionnaires.
2. Introduction et en particulier 2.2 Approche retenue pour répondre aux actions A3 et A5.	Contexte	Périmètre d'expertise	Le groupe de travail s'appuie sur les travaux du GT FALC 1, et a sélectionné onze couples danger/fromage/espèce animale.	La sélection des couples les plus prioritaires s'est fondée sur quatre critères : le nombre de TIAC, les retraits/rappels enregistrés, la position dans la classification PrioR, ainsi que la	Le résultat de l'expertise présente 11 combinaisons, le risque est donc globalement sous-évalué. D'autres combinaisons auraient pu permettre d'être plus exhaustif en termes de risque et d'appuyer l'impact des mesures de maîtrise, ou de

				disponibilité des données (en tenant compte du risque de sous-estimation en cas de données insuffisantes).	proposer d'autres mesures de maîtrise.
3. Mesures de maîtrise considérées dans le modèle (intro)	Méthode	Qualité et quantité des données d'entrée	Manque d'information et subjectivité, potentiellement, par recherche dans la littérature et par dires d'experts.	Ce manque d'information est pris en compte de manière quantitative, notamment par l'introduction d'intervalles d'incertitude autour des paramètres des modèles. Par ailleurs, la subjectivité dans les remontées d'information peut avoir conduit à omettre certaines mesures de maîtrise.	Impact sur les résultats très faible d'autant plus que la démarche est décrite en détail en début de la section 3 ; la méthode utilisée est à la fois transparente et bien documentée.
3.1.1 Mesure de maîtrise dans les élevages - STEC	Méthode	Qualité et quantité des données d'entrée	L'efficacité des mesures de maîtrise vis-à-vis des souches de STEC de sérotypes non-O157:H7 est considérée équivalente à celle qui a été évaluée sur les souches de STEC du sérotype O157:H7.	Non prise en compte	Sous-estimation ou surestimation du risque mais a priori modérée.
3.1.2 Mesure de maîtrise dans les élevages - Salmonella	Méthode	Qualité et quantité des données d'entrée	L'introduction du danger par les aliments ou l'eau n'a pas été pris en compte en raison de l'absence de données quantitatives disponibles.	Non prise en compte	Impact possible sur l'effet des mesures de maîtrise au niveau de la ferme, mais difficilement quantifiable.
3.1.2 Mesure de maîtrise dans les élevages - Salmonella	Méthode	Qualité et quantité des données d'entrée	Efficacité des mesures de maîtrise, notamment détection des salmonelloses cliniques, hygiène des locaux, des animaux et de la traite est considérée équivalente pour tous les sérovars de Salmonella .	Simplification	Difficile d'évaluer si cette incertitude a un effet de surestimation ou sous-estimation du risque,
3.1.2 Mesure de maîtrise dans les élevages - Salmonella	Méthode	Qualité et quantité des données d'entrée	La sensibilité et la spécificité des tests sérologiques présentent des limites.	La sensibilité et la spécificité des tests sérologiques n'ont pas été prises	Surestimation de l'effet de la mesure non quantifiable pour le moment (mais pourrait l'être dans le futur si les tests s'améliorent en sensibilité et spécificité).

3.1.3 Mesure de maîtrise dans les élevages - Listeria	Méthode	Qualité et quantité des données d'entrée	La dernière étude sur les mammites à <i>L. monocytogenes</i> en France date de 1998 d'où une incertitude sur la fraction actuelle du troupeau atteint de mammites.	10% de la contamination du lait à <i>L. monocytogenes</i> est liée aux mammites.	Effet de ce manque d'études a un effet sur le risque, mais non quantifiable.
3.1.3 Mesure de maîtrise dans les élevages - Listeria	Méthode	Qualité et quantité des données d'entrée	La dispersion et la contamination par <i>Listeria monocytogenes</i> dans l'environnement de production sont des phénomènes multifactoriels. Or, cette étude les résume uniquement à une mauvaise maîtrise de la qualité des aliments fermentés, ce qui constitue une vision réductrice	prise en compte de la dispersion via la proportion de ferme maîtrisant l'ensilage	Impact possible sur l'effet des mesures de maîtrise au niveau de la ferme, mais difficilement quantifiable.
3.2.1 Mesures de maîtrise pendant la transformation	Contexte	Qualité et quantité des données d'entrées	La vitesse d'acidification peut être variable même au sein d'une même catégorie de fromage (diversité des fromages)	Evolution sur une gamme de pH choisie pour chaque technologie	Impact sur l'évaluation du risque mais difficile à quantifier surtout pour les productions fermières.
3.2.1 Mesures de maîtrise pendant la transformation	Contexte	Qualité et quantité des données d'entrées	L'évolution pendant l'affinage des caractéristiques physico-chimiques (pH, aw, composés produits par la flore technologique) dans le cœur du fromage ou sur la croute peut être variable même au sein d'une même catégorie de fromages (diversité des fromages)	Prise en compte de la remontée du pH mais pas des autres facteurs variables (aw)	Sous-estimation ou surestimation du risque faible.
3.2.1 Mesures de maîtrise pendant la transformation	Contexte	Qualité et quantité des données d'entrées	L'effet des souches bactériocines + sur la maîtrise de la croissance de <i>Listeria</i> pendant l'affinage des PM et PPNC est variable selon les études	Mesure de maîtrise sans prise en compte de l'incertitude	Sous-estimation ou surestimation du risque faible.
3.2.1 Mesures de maîtrise pendant la transformation	Contexte	Qualité et quantité des données d'entrées	L'effet de la durée de l'affinage a un impact peu documenté sur la persistance de <i>Salmonella</i> et EHEC (rares publications même si celles-ci sont robustes)	Prise en compte de l'incertitude mais peu de données (peu de souches, peu de lots)	Sous-estimation ou surestimation du risque faible.
3.2.1 Mesures de maîtrise pendant la transformation	Contexte	Qualité et quantité des données d'entrées	L'effet de la durée de l'affinage a un impact variable sur la croissance et/ou survie de <i>Listeria monocytogenes</i>	Du fait d'une trop grande incertitude, le GT ne prend pas en compte le déclin potentiel de <i>L. monocytogenes</i>	Surestimation du risque, mais difficile à quantifier.

				après sa croissance au cours de l'affinage et la conservation	
3.2.2 Surveillance microbiologique en cours de fabrication ou sur les produits finis	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Représentativité des 14 entreprises laitières ayant servi à déterminer le pourcentage des entreprises qui recherchent les STEC.	Non prise en compte	Sous-estimation ou surestimation du risque faible.
3.3 Mesures de maîtrise en lien avec les consommateurs	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Une revue de la littérature n'a pas été faite pour les mesures de maîtrise en lien avec les comportements des consommateurs.	Non prise en compte de mesures en dehors de celles déjà établies (et consignées dans les rapports précédents de l'Anses).	Sous-estimation ou surestimation du risque faible car il est improbable qu'une mesure de maîtrise majeure ait échappé au GT et au CES.
3.3 Mesures de maîtrise en lien avec les consommateurs	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	L'absence d'information sur la répartition entre DLC (date limite de consommation) et DDM (date de durabilité minimale) introduit une incertitude.	Prise en compte en mettant dans le scénario alternatif tout en DLC	Sous estimation du risque dans le scénario alternatif mais impossible d'évaluer de combien car on ne connaît pas la proportion DLC/DDM actuelle.
3.3 Mesures de maîtrise en lien avec les consommateurs	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	L'enquête INCA3 datant de 2014, soit de plus de dix ans, elle introduit une incertitude quant à la représentativité des données actuelles, notamment en ce qui concerne les habitudes de consommation par classe d'âge et les températures des réfrigérateurs domestiques.	Non prise en compte	Sous-estimation ou surestimation du risque faible à modérée.
3.3 Mesures de maîtrise en lien avec les consommateurs	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	L'enquête INCA3 repose sur du déclaratif, il peut donc y avoir un biais.	Non pris en compte	Sous-estimation du risque faible à modérée (biais de non déclaration de comportement à risque, par ex. consommer après la DLC, laisser le produit hors du réfrigérateur, etc.).
3.3 Mesures de maîtrise en lien avec les consommateurs	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Manque de connaissances concernant le SHU adulte, les sérotypes impliqués et la sévérité des formes cliniques des infections.	La mesure d'éviction concernant le danger STEC pour les personnes âgées de 65 ans et plus n'a pas été prise en compte	Sous-estimation du risque faible.

3.3 Mesures de maîtrise en lien avec les consommateurs	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Manque de connaissances concernant le comportement du consommateur vis-à-vis de la lecture et le respect des indications d'utilisation figurant sur l'étiquette.	Non prise en compte	Surestimation de l'effet des mesures dans les scénarios alternatifs
4. Modèles d'appréciation des risques					
4.1.1 - STEC Identification et caractérisation des dangers	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Relation dose-réponse basée sur la souche STEC O157:H7 ayant entraîné une large épidémie en 2005.	L'évaluation repose sur l'hypothèse que toutes les souches STEC de la classe I présentent une virulence équivalente à celle de la souche O157:H7 impliquée dans l'épidémie de 2005, tandis que les souches appartenant aux autres classes sont considérées comme dix fois moins susceptibles d'entraîner une maladie	Sous-estimation ou surestimation du risque faible.
4.1.1 - STEC Identification et caractérisation des dangers	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Choix du modèle dose-réponse pour STEC qui ne prend pas en compte le caractère particulier de cette intoxication à travers l'activation d'un phage (+ éventuellement un effet seuil)	Non prise en compte	Surestimation du risque difficile à quantifier (probablement modérée)
4.1.1 - STEC Identification et caractérisation des dangers	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Les doses-réponses pour STEC et Salmonella ne prennent pas suffisamment en compte les facteurs de l'hôte et de son microbiote par rapport à chaque pathogène	Cet effet a été pris en compte pour Listeria monocytogenes (la dose-réponse utilisée ayant été corrigée par rapport à des données épidémiologiques)	Surestimation du risque pour STEC et Salmonella (faible à modérée)
4.1.1 - STEC Identification et caractérisation des dangers	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Proportion de souches STEC des différentes classes de virulence chez les animaux porteurs.	La prise en compte repose sur l'hypothèse que la répartition des types de souches chez les animaux porteurs reflète celle observée dans les données du LNR	Sous-estimation ou surestimation du risque modérée.

				sur le lait cru et les fromages au lait cru.	
4.1.2 - Salmonella Identification et caractérisation des dangers	méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Les sérovars de <i>Salmonella</i> sont classés en deux catégories de virulence – sérovars 'moins virulents' et 'plus virulents' – en faisant l'hypothèse qu'ils présentent un comportement identique dans le lait et les fromages, ainsi qu'un même niveau de détection.		Difficile d'évaluer si ce manque de précision (cette approximation) a un effet de surestimation ou sous estimation du risque.
4.1.2 - Salmonella Identification et caractérisation des dangers	méthod e		La relation dose réponse utilisée a été établie sur la base de la répartition des sérovars dans les filières alimentaires et les cas humains aux USA. Certains sérovars ont cependant un fond génétique différent entre les USA et l'Europe	Hypothèse que les souches en EU ont les mêmes capacités de virulence qu'aux USA	Sous-estimation ou surestimation du risque faible à modérée.
4.1.3 - Listeria Identification et caractérisation des dangers	méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Absence de données sur la diversité de <i>L. monocytogenes</i> dans le lait (catégories de virulence). La répartition entre les trois classes est considérée identique quel que soit le stade de production.	Même proportion pour toutes les classes	Sous-estimation ou surestimation du risque faible à modérée.
4.1.3 - Listeria Identification et caractérisation des dangers	Méthod e		La relation dose réponse ne tient pas compte de l'incertitude	Pas de prise en compte de l'incertitude	Difficile d'évaluer si cette incertitude a un effet de surestimation ou sous estimation du risque. Par contre, elle a un effet sur la communication du résultat final: les intervalles de confiance sont plus faibles qu'ils ne devraient l'être,
4.1.3 - Listeria Identification et caractérisation des dangers			Le pourcentage de létalité global appliqué au nombre de cas de listériose est considéré comme indépendant des différentes catégories de populations sensibles.	Utilisation d'un taux de létalité global pour l'ensemble des personnes immunodéprimées	Difficile d'évaluer si ce manque de précision a un effet de surestimation ou sous estimation du risque.
4.2 et 4.2.1 (intro) Construction du modèle pour l'intégration des	Méthod e	Exploitatio n des données d'entrée	Le nombre de vaches dans chaque ferme ainsi que le nombre de fermes fournissant les entreprises restent	Aucune	Difficile d'évaluer si ce manque de précision (cette simplification) a un effet de

mesures de maîtrise et de surveillance - Cas de la transformation par les entreprises			constants, ce qui constitue une simplification assumée.		surestimation ou sous-estimation du risque.
4.2 et 4.2.1 (intro) Construction du modèle pour l'intégration des mesures de maîtrise et de surveillance - Cas de la transformation par les entreprises	Méthode	Exploitation des données d'entrée	Maximum de 100 000 simulations, ce qui veut dire qu'avec plus de 4 distributions dans le modèle, le résultat ne reflète pas les percentiles extrêmes des distributions (avec 5 distributions, il faut déjà plus de 3 millions d'itérations pour être sûr de générer un cas de figure croisant les 5èmes percentiles de chaque distribution), ceci entraîne un manque de précision dans l'estimation.	Les résultats ne sont présentés que sous forme de moyenne, bien moins sensible à cette imprécision.	Aucun effet sur la présentation des résultats sous forme de moyenne (cette incertitude n'a de conséquence que sur les percentiles extrêmes). De plus, le non effet de cette limitation dans le nombre de simulations a été vérifié en faisant tourner le modèle plusieurs fois pour en tester la stabilité. Lorsque le résultat était "risque nul", il a été présenté comme "probabilité <0,0001" (avec 100 000 simulations, niveau de précision de 1 sur 10 000 atteignable).
4.2.1.1 Module ferme - 4.2.1.1.1 Caractéristiques des fermes	Méthode	Qualité et quantité des données d'entrée	Tailles des fermes en termes d'animaux et de production de lait.	Prise en compte: la valeur du nombre d'animaux est fixée à la moyenne nationale des élevages laitiers dans les bassins de production fromagers, soit 66 vaches laitières (7770 litres de lait/an/vache).	Sous-estimation ou surestimation du risque faible.
4.2.1.1 Module ferme - 4.2.1.1.1 Caractéristiques des fermes	Méthode	Qualité et quantité des données d'entrée	Données sur les quantités de matières fécales transférées dans le lait lors de la traite.	Prise en compte: utilisation de la concentration en E. coli des laits de tank comme indicateur de la quantité moyenne de matières fécales ayant été transférées.	Sous-estimation ou surestimation du risque faible.
4.2.1.1 Module ferme - 4.2.1.1.1 Caractéristiques des fermes	Méthode	Qualité et quantité des données d'entrée	Niveaux de STEC excrétés dans les fèces inférieurs à la limite de détection des méthodes utilisées.	Prise en compte: la part des animaux porteurs présentant des niveaux de contamination inférieurs à la limite de détection est estimée à 22,9 % (Clough, Clancy, and French 2009; Robinson 2004).	Sous-estimation ou surestimation du risque faible.

4.2.1.1 Module ferme - 4.2.1.1.1 Caractéristiques des fermes	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Incertitude sur le pourcentage d'animaux porteurs de STEC stx2a+ et/ou stx2d+.	Prise en compte : estimation à partir de la prévalence globale de STEC et des données du LNR sur le lait cru et les fromages au lait cru.	Sous-estimation ou surestimation du risque modérée
4.2.1.1 Module ferme - 4.2.1.1.1 Caractéristiques des fermes	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Variabilité des niveaux d'excrétion des STEC dans les matières fécales, y compris en dessous de la limite de détection des méthodes utilisées.	Prise en compte : ajustement de la distribution bimodale (incluant la répartition des niveaux de STEC dans les fèces selon Stephens et al 2009, et la fraction des animaux dont les concentrations de TSEC sont inférieures à la limite de détection).	Sous-estimation ou surestimation du risque faible.
4.2.1.1 Module ferme - 4.2.1.1.3 Salmonella	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Seuls 2 niveaux d'hygiène sont définis: satisfaisant ou non satisfaisant	Démarche de simplification des situations de terrain	Simplification n'ayant pas de conséquence sur le risque ; par contre, l'effet sur les mesures de maîtrise perd en précision.
4.2.1.1 Module ferme - 4.2.1.1.3 Salmonella	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	La probabilité de déclencher une salmonellose clinique (2%) est issue d'une étude américaine (Cummings et al. 2010)	Pas d'autres données identifiées	Difficile d'évaluer si ce manque de données a un effet de surestimation ou sous-estimation du risque.
4.2.1.1 Module ferme - 4.2.1.1.4 Listeria	méthod e	qualité et quantité des données	Le pourcentage de ferme présentant un défaut d'ensilage provient d'une seule étude de 2003	17% des fermes n'ont pas une bonne maîtrise de leur alimentation fermentée	Difficile d'évaluer si ce manque de données a un effet de surestimation ou sous-estimation du risque.
4.2.1.1 Module ferme - 4.2.1.1.4 Listeria	méthod e	qualité et quantité des données	Une bonne hygiène à la traite est exclue dans une ferme ayant une mauvaise hygiène d'entretien des locaux et du matériel	Hypothèse du GT	Surestimation de l'effet de la mesure de maîtrise
4.2.1.2 Fabrication des fromages	Méthod e	Exploitatio n des données d'entrée	Le modèle choisi (gamma sans interaction) peut sous-estimer l'effet combiné du pH, de l'aw et de la température.	Aucune	Difficile d'évaluer si ce choix de modèle a un effet de surestimation ou sous-estimation du risque.
4.2.1.2 Fabrication des fromages	Méthod e	Exploitatio n des données d'entrée	Le modèle choisi (gamma sans interaction) avec un popt qui décrit l'effet matrice peut entraîner une erreur si le popt n'est pas correctement estimé.	Aucune	Difficile d'évaluer si ce choix de modèle a un effet de surestimation ou sous-estimation du risque.

4.2.1.2 Fabrication des fromages	Méthod e	Exploitatio n des données d'entrée	Le modèle choisi (gamma sans interaction) avec un <i>loop</i> qui décrit tous les autres effets (matrice mais aussi souches inhibitrices) est peut-être un peu simpliste	Aucune	Difficile d'évaluer si ce choix de modèle a un effet de surestimation ou sous-estimation du risque.
4.2.1.2 Fabrication des fromages	Méthod e	Exploitatio n des données d'entrée	Le modèle de survie qui repose sur un D dépendant de nombreux effets (pH, aw, molécules antimicrobiennes) peut être fragile.	Aucune	Difficile d'évaluer si ce choix de modèle a un effet de surestimation ou sous-estimation du risque.
4.2.1.3 Description des consommateurs	Méthod e	Exploitatio n des données d'entrée	Le modèle suppose que le volume de produits mis sur le marché correspond exactement au volume consommé par la population.	Prise en compte lors des mesures d'évitement : redistribution de la part des fromages non consommés sur les populations non sensibles	Cette hypothèse entraîne une surestimation de l'exposition de la population non sensible et donc une surestimation du risque pour la population générale.
4.2.1.3 Description des consommateurs	Méthod e	Exploitatio n des données d'entrée	Taille de portions identiques quel que soit le consommateur ce qui est une simplification	Aucune	Cette approximation entraîne une surestimation de la taille de la portion pour les enfants, et une sous-estimation pour les adultes, et par voie de conséquence le même effet sur le risque.
4.2.1.3 Description des consommateurs	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Estimation du temps de stockage assez incertain car basé sur des sources peu nombreuses	Son effet sera testé de façon quantitative (Monte carlo 2nd ordre) si ce facteur est identifié comme important	Difficile d'évaluer si ce manque de données a un effet de surestimation ou sous-estimation du risque. Par contre, des scénarios comprenant différents temps de stockage seront générés si cette variable a un impact sur le résultat final.
4.2.1.3 Description des consommateurs	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Le volume de production des fromages a été considéré comme constant.	Aucune	Difficile d'évaluer si cette approximation entraîne une surestimation ou sous-estimation du risque.
4.2.2 Cas de la production fermière	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	La production fermière génère une hétérogénéité plus grande qu'il est difficile de quantifier.	Aucune	Difficile d'évaluer si cette hétérogénéité a un effet de surestimation ou sous-estimation du risque.
4.2.3 Spécificités liées aux caprins et ovins	Méthod e	Qualité et quantité des données d'entrée	Les données sur la filière ovine et caprine étant limitées, le modèle reste quelque peu schématique.	Les paramètres relatifs à l'hygiène dans les fermes sont considérés comme équivalents pour les différentes espèces animales élevées.	Difficile d'évaluer si cette approximation entraîne une surestimation ou sous-estimation du risque.

				Cependant, la majorité des données disponibles proviennent des fermes bovines.	
5.1.3 Sorties du modèle du scénario de base - module "consommateur"	Méthode	Qualité et quantité des données d'entrée	Une estimation du nombre de ruptures de la chaîne du froid a été réalisée en se basant sur la composition des ménages français, ce qui est une donnée mise à jour régulièrement par l'INED. Par contre, à partir de là, une approximation a été faite : un seul réfrigérateur par ménage, un repas commun par ménage.	Aucune	Difficile d'évaluer si cette approximation entraîne une surestimation ou sous-estimation du risque.

Annexe 6 : Résultats détaillés de l'efficacité des mesures de maîtrise et de surveillance

Cf fichier : Annexe_6.xlsx



anses

AGENCE NATIONALE DE SÉCURITÉ SANITAIRE
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
14 rue Pierre et Marie Curie 94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr