

Maîtrise des Salmonelles en production porcine

A quel(s) maillon(s) de la filière intervenir ?

Stéphane KREBS et Catherine BELLOC

UMR BIOEPAR, Oniris, INRA, LUNAM, BP40706, F-44307 Nantes Cedex 3, France

stephane.krebs@oniris-nantes.fr

catherine.belloc@oniris-nantes.fr

Maîtrise des Salmonelles en production porcine : A quel(s) maillon(s) de la filière intervenir ?

En santé humaine, les Salmonelles constituent une cause majeure de maladies d'origine alimentaire et la viande de porc peut être une source de salmonelloses humaines. Dans un contexte de mise en place de programmes de maîtrise de *Salmonella* visant à réduire la prévalence de ces entérobactéries dans la filière de production, la présente communication se propose de développer un outil d'aide à la décision destiné à identifier, sur l'ensemble de la chaîne de production porcine (élevage, transport-attente à l'abattoir, abattoir), le(s) maillon(s) pertinent(s) d'intervention en matière de maîtrise du portage de *Salmonella*. A cette fin, un modèle mathématique est développé de manière à lier la prévalence de *Salmonella* à la sortie de l'abattoir aux interventions potentiellement mises en œuvre aux différents maillons de la filière. Ce modèle est ensuite destiné à être paramétré, sur la base de sorties de modèles épidémiologiques et de données issues de la littérature et validées à dire d'experts. Des simulations mathématiques sont alors réalisées, afin d'identifier les différents modes et niveaux d'intervention permettant d'atteindre, à moindre coût, un objectif donné en termes de réduction de la prévalence du portage à la sortie de l'abattoir (analyse coût-efficacité). Afin d'illustrer la démarche, une application numérique est proposée. Les résultats obtenus ont ainsi permis de faire ressortir l'incidence de l'hétérogénéité des lots en termes de prévalence sur le choix des stratégies d'intervention, mais également d'apprécier quantitativement les risques de défaillance de la sécurité sanitaire associés à chacune des stratégies considérées.

Control of Salmonella in pig supply chain : which step to target ?

Salmonella is a major concern in public health, and pig products can be a source of human infection. This study aims at developing a tool useful for the decision-making process regarding salmonella control measures throughout the pig supply chain. The main levels considered are the farm, transport-lairage and the slaughtering process. A mathematical model was developed in order to determine the influence of control measures implemented at several steps during the supply chain on *Salmonella* prevalence on carcasses at the end of the slaughtering process. The model is parameterized using the outcomes of epidemiological models as well as expert knowledge. Using economic parameters, mathematical simulations are then performed to determine which measures implemented at which step(s) are the most cost-effective for *Salmonella* control. To illustrate this approach, a numerical application is proposed. Simulation results enabled us to highlight the incidence of the heterogeneity of batches in regard to *Salmonella* prevalence on the choice of an intervention strategy, but also to assess quantitatively the risks of food safety failure associated with each considered strategy.

INTRODUCTION

En raison de la problématique de santé publique associée, la présence de salmonelles dans la filière porcine constitue une préoccupation de premier plan. Ces bactéries ubiquistes peuvent contaminer les animaux, ainsi que les produits qui en sont issus à différents stades de la filière. Des actions de maîtrise peuvent donc être mises en œuvre aux différents maillons de la filière, actions dont l'efficacité épidémiologique mais également économique demeurent à évaluer.

Dans ce contexte, l'approche par modélisation, en représentant le système complexe que constitue la filière de production, permet d'élaborer un outil d'aide à la décision pour la mise en œuvre d'actions de maîtrise, en combinant analyses épidémiologique (efficacité des mesures sur la prévalence des salmonelles dans la filière porcine) et économique (analyse coût-efficacité). Les travaux présentés dans la présente communication entendent répondre à un double objectif.

Il s'agit tout d'abord de proposer un outil générique destiné à servir de support de réflexion à l'identification des maillons pertinents d'intervention au sein d'une filière de production en matière de gestion de la sécurité sanitaire de l'aliment. Il s'agit ensuite de rendre opérationnel le modèle proposé, de manière à pouvoir hiérarchiser, pour un agent pathogène donné (en l'occurrence les salmonelles), les différentes stratégies d'intervention potentielles.

1. CONSTRUCTION DU CADRE D'ANALYSE

Le cadre d'analyse proposé repose sur la définition d'une prévalence des carcasses à la sortie de l'abattoir en l'absence d'intervention de maîtrise, notée p_i et modélisée comme suit :

$$(1) \quad p_i = p_o + tx \cdot (1 - p_o) \cdot p_o \quad \text{avec} \quad 0 \leq p_o \leq 1$$

où p_o désigne la prévalence à la sortie de l'élevage en l'absence d'intervention, tx le risque de contamination post-élevage (t correspond au temps écoulé entre la sortie de l'élevage et l'entrée à l'abattoir et x au taux de nouvelles infections) et $(1 - p_o) \cdot p_o$ un multiplicateur qui gouverne le taux de nouvelles infections. Dans la relation (1), les nouvelles infections (contamination post-élevage) sont fonction du niveau de la prévalence à la sortie de l'élevage (p_o). L'idée sous-jacente est que l'infection se propage d'animal à animal et qu'ainsi la vitesse de transmission est fonction de la manière dont chaque animal infecté entre en contact avec des animaux non infectés. Par conséquent, lorsque le niveau de prévalence est faible (ou à l'inverse élevé), chaque animal entre en contact avec un nombre important (ou à l'inverse limité) d'individus sensibles et il en résulte un risque d'infection accru (ou réduit) sur une période de temps donnée.

1.1. Modélisation des interventions de maîtrise

Ce cadre d'analyse peut ensuite être aménagé pour modéliser des stratégies d'intervention de maîtrise. Dans le présent travail, trois niveaux d'intervention sont considérés au sein de la filière de production : (i) la maîtrise en élevage ; (ii) l'intervention lors du transport vers l'abattoir et l'attente avant tuerie ; et (iii) la maîtrise à l'abattoir. Ces différentes modalités peuvent être considérées isolément ou être combinées. Le modèle développé permet ainsi de prendre en considération sept modalités potentielles d'interventions, synthétisées dans le *tableau 1*.

Tableau 1 - Modalités d'interventions modélisées

<i>Intervention</i>	<i>Elevage</i>	<i>Transport et attente</i>	<i>Abattoir</i>
E	x		
A			x
T		x	
EA	x		x
ET	x	x	
AT		x	x
EAT	x	x	x

L'intervention de maîtrise en **élevage (E)**, contribue à réduire la prévalence observée en élevage en l'absence d'intervention p_o dans une proportion α , en posant $0 < \alpha < 1$. Les mesures de maîtrise implémentées peuvent, par exemple, consister en un renforcement de la biosécurité (amélioration des pratiques d'hygiène), en une acidification de l'eau et/ou de l'aliment, etc. Ainsi, lorsque des efforts de maîtrise sont entrepris, la prévalence de l'infection devient :

$$(2) \quad p_E = (1 - \alpha) \cdot p_o$$

La spécification retenue présuppose une relation linéaire entre la prévalence à la sortie de l'élevage après intervention p_E et la prévalence qui aurait été observée en l'absence d'intervention p_o . Graphiquement (figure 1a), il convient de souligner que plus l'intervention en élevage est efficace, plus la courbe de prévalence p_E se rapproche de l'axe des abscisses.

L'intervention de maîtrise au niveau du **transport et de l'attente à l'abattoir (T)** peut être modélisée de la même manière, en supposant qu'une telle intervention contribue à réduire les risques de contamination post-élevage dans une proportion γ (en posant comme précédemment $0 < \gamma < 1$). L'intervention au niveau du transport et de l'attente à l'abattoir recouvre, par exemple, le nettoyage et la désinfection des camions de transport et des aires d'attentes à l'abattoir. La prévalence avant abattage (notée p_T) peut alors être définie comme suit :

$$(3) \quad p_T = p_E + (1 - \gamma) \cdot tx \cdot (1 - p_E) \cdot p_E$$

La relation entre la prévalence à la sortie de l'élevage (p_E) et la prévalence à l'entrée à l'abattoir est non linéaire, du fait du risque de contamination post-élevage. Graphiquement, plus l'intervention est efficace, plus la courbe de prévalence associée à l'intervention au niveau du transport et de l'attente à l'abattoir est proche de la diagonale (figure 1b).

Enfin, dans le cas de l'intervention de maîtrise à l'**abattoir (A)**, la prévalence de l'infection à la sortie de l'abattoir (p_A) est réduite dans une proportion β (en posant comme précédemment $0 < \beta < 1$).

Les interventions de maîtrise à l'abattoir consistent, par exemple, en une réduction des contaminations fécales des carcasses, en la décontamination des bacs d'échaudage.

Comme ces interventions interviennent à l'issue de la période d'élevage et du transport et de l'attente à l'abattoir, la prévalence après intervention à l'abattoir peut s'écrire :

$$(4) \quad p_A = (1 - \beta) \cdot p_T$$

Comme pour l'intervention en élevage, la relation entre la prévalence à la fin du processus d'abattage et la prévalence à l'entrée à l'abattoir est supposée linéaire.

Graphiquement, plus l'intervention de maîtrise est efficace, plus la courbe de prévalence après intervention à l'abattoir se rapproche de l'axe des abscisses (figure 1c).

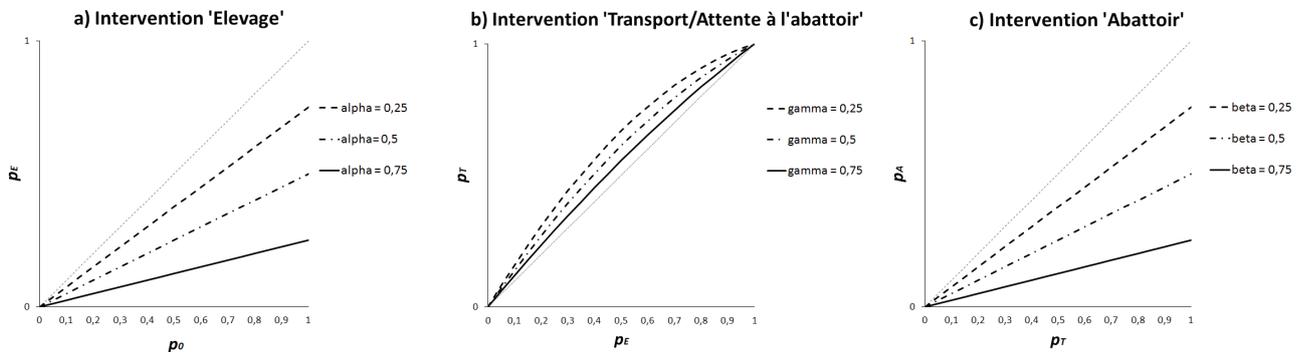


Figure 1 - Influence de la valeur des paramètres d'efficacité de l'intervention sur la prévalence

2. EFFICACITE COMPAREE DES INTERVENTIONS DE MAITRISE

Les trois graphes présentés sur la figure 1 peuvent être combinés dans un diagramme unique afin d'illustrer comment les interventions de maîtrise implémentées aux différents maillons de la filière peuvent impacter la prévalence des carcasses à la sortie de l'abattoir (figure 2).

2.1. Intervention en élevage vs. intervention à l'abattoir

Pour clarifier le propos, nous nous focaliserons dans un premier temps sur deux interventions considérées isolément (intervention en élevage vs. intervention à l'abattoir).

Sur la figure 2, l'intervention en élevage est matérialisée en trait pointillé, l'intervention à l'abattoir en trait plein.

L'intervention permettant d'atteindre la prévalence des carcasses à la sortie de l'abattoir la plus faible est considérée comme la plus efficace.

Considérons un niveau donné de prévalence à la sortie de l'élevage en l'absence d'intervention (50 %, par exemple). L'intervention en **élevage** uniquement contribue à réduire la prévalence à la sortie de l'élevage (qui s'établit à 20 % environ sur la figure 2). Du fait des risques de contamination post-élevage, le niveau de prévalence à l'entrée à l'abattoir s'accroît (pour atteindre 30 % environ). En l'absence d'intervention de maîtrise à l'abattoir, la prévalence des carcasses à la sortie de l'abattoir se maintient à ce niveau. Dans le cas d'une intervention à l'**abattoir** uniquement, la prévalence à la sortie de l'élevage demeure égale à 50 %. Du fait des risques de contamination post-élevage, le niveau de prévalence après transport et attente des animaux à l'abattoir s'accroît pour atteindre 70 % environ, mais l'intervention de maîtrise à l'abattoir permet de ramener la prévalence des carcasses à la sortie de l'abattoir à un peu plus de 40 %. Ainsi, dans le cas illustré par la figure 2, il apparaît que l'intervention isolée en élevage s'avère plus efficace qu'une intervention isolée à l'abattoir. Cette hiérarchisation des interventions demeure néanmoins fortement conditionnée par la valeur des paramètres retenus pour la construction du modèle, et notamment des valeurs des paramètres d'efficacité α et β . En combinant les relations (2), (3) et (4), il devient également possible d'exprimer directement la prévalence des carcasses à la sortie de l'abattoir en fonction de la prévalence qui aurait été obtenue en l'absence d'intervention, et cela pour les différentes catégories d'interventions considérées.

La prévalence des carcasses à la sortie de l'abattoir dans le cas d'une intervention en élevage peut alors s'écrire :

$$(5) \quad p_E = (1 - \alpha) \cdot p_0 + tx \cdot (1 - (1 - \alpha) \cdot p_0) \cdot ((1 - \alpha) \cdot p_0),$$

tandis que la prévalence des carcasses à la sortie de l'abattoir devient, dans le cas d'une intervention à l'abattoir :

$$(6) \quad p_A = (1 - \beta) \cdot (p_0 + tx \cdot (1 - p_0) \cdot p_0).$$

A partir de ces deux relations, il devient mathématiquement possible d'identifier les valeurs des paramètres qui font que l'intervention à l'abattoir est plus efficace qu'une intervention en élevage. La relation suivante doit alors être vérifiée :

$$(7) \quad p_A < p_E \quad \text{si} \quad \beta > \alpha \cdot \left(1 - \frac{(1 - \alpha) \cdot tx \cdot p_0}{1 + tx \cdot (1 - p_0)} \right)$$

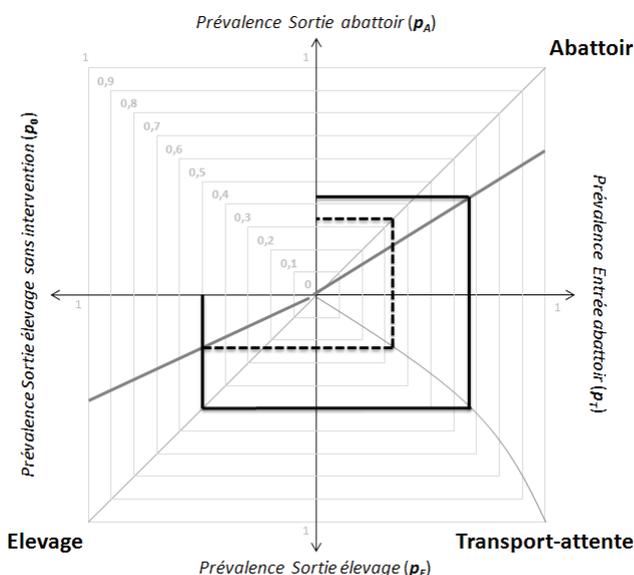


Figure 2 - Efficacité comparée d'interventions de maîtrise

Lorsque les interventions en élevage et à l'abattoir sont caractérisées par une même efficacité ($\alpha = \beta$), l'intervention à l'abattoir tend à s'avérer plus efficace que l'intervention en élevage, du fait des risques de contamination post-élevage. Il convient également de noter que, toutes choses égales par ailleurs :

- l'intérêt d'une intervention isolée à l'abattoir (plutôt qu'en élevage) tend à s'accroître à mesure que le risque de contamination post-élevage s'accroît ;
- l'intérêt d'une intervention isolée à l'abattoir (plutôt qu'en élevage) tend à s'accroître à mesure que le niveau de prévalence en l'absence d'intervention p_0 s'accroît ;
- Enfin, une modalité d'intervention (en abattoir, par exemple) peut s'avérer plus efficace pour des niveaux faibles de prévalence en l'absence d'intervention en élevage (p_0), tandis qu'une autre modalité d'intervention (en élevage, par exemple) peut s'avérer plus efficace pour des niveaux élevés de p_0 .

2.2. Intervention au niveau du transport et de l'attente à l'abattoir

La prévalence des carcasses à la sortie de l'abattoir obtenue dans le cas d'une intervention mise en place durant la phase de transport et d'attente des animaux à l'abattoir (p_T) peut, comme précédemment, être évaluée en combinant les relations (2), (3) et (4):

$$(8) \quad p_T = p_0 + (1 - \gamma) \cdot tx \cdot (1 - p_0) \cdot p_0$$

La relation (8) permet ainsi d'établir que l'efficacité de l'intervention au niveau du transport et de l'attente à l'abattoir est d'abord croissante (jusqu'à ce que $p_0 = 50\%$), puis décroissante.

L'efficacité de l'intervention en abattoir sera considérée comme supérieure à celle obtenue en intervenant sur le transport et l'attente à l'abattoir ($p_A < p_T$) lorsque la relation suivante est vérifiée :

$$(9) \quad \gamma < \beta \cdot \left(1 + \frac{1}{tx \cdot (1 - p_0)} \right)$$

De la même manière, l'efficacité d'une intervention en élevage sera considérée comme supérieure à celle obtenue en intervenant sur le transport et l'attente à l'abattoir ($p_E < p_T$) lorsque la relation suivante est vérifiée :

$$(10) \quad \gamma < \alpha \cdot \left(1 + \frac{1 - (1 - \alpha) \cdot tx \cdot p_0}{tx \cdot (1 - p_0)} \right)$$

L'intervention au niveau des transports et l'attente à l'abattoir n'influent que sur le risque de contamination post-élevage, il convient de noter que l'intervention en élevage (respectivement à l'abattoir) tend généralement à s'avérer plus efficace qu'une intervention sur le transport et l'attente à l'abattoir. Pour que ce dernier type d'intervention soit considéré comme plus efficace qu'une intervention en élevage (ou bien à l'abattoir), il faudrait en effet que la valeur du paramètre α (respectivement β) soit très faible et que la valeur de γ soit particulièrement élevée (i.e. tende vers l'unité, ce qui sous-entendrait une efficacité totale de la mesure pour contrecarrer le risque de contamination post-élevage).

Il faut par ailleurs que le risque de contamination post-élevage (valeur de tx) soit élevé pour que l'intervention à l'échelle du transport et de l'attente à l'abattoir puisse être considérée comme intéressante.

2.3. Combinaisons de mesures

En procédant comme précédemment, il est également possible de comparer des combinaisons d'interventions à différents maillons de la filière de production. L'objectif de la présente communication n'étant pas de comparer deux à deux et de manière exhaustive les 7 options disponibles (autrement dit les 21 comparaisons possibles), les résultats ne sont pas présentés. Il convient néanmoins de souligner que de manière générale, l'efficacité associée à une combinaison de mesures s'avère toujours supérieure à celle obtenue en implémentant les mesures isolément. Ainsi, l'efficacité d'une intervention simultanée en élevage et à l'abattoir sera toujours supérieure à celle associée à une intervention isolée en élevage ou à l'abattoir. Les prévalences associées aux différentes modalités potentielles d'intervention sont synthétisées dans le *tableau 2*.

Tableau 2 - Prévalence associée aux interventions modélisées

Intervention	Prévalence des carcasses à la sortie de l'abattoir
O	$p_i = p_0 \cdot [1 + tx \cdot (1 - p_0)]$
E	$p_E = (1 - \alpha) \cdot p_0 \cdot [1 + tx \cdot (1 - (1 - \alpha) \cdot p_0)]$
A	$p_A = (1 - \beta) \cdot p_0 \cdot [1 + tx \cdot (1 - p_0)]$
T	$p_T = p_0 \cdot [1 + (1 - \gamma) \cdot tx \cdot (1 - p_0)]$
EA	$p_{EA} = (1 - \alpha) \cdot (1 - \beta) \cdot p_0 \cdot [1 + tx \cdot (1 - (1 - \alpha) \cdot p_0)]$
ET	$p_{ET} = (1 - \alpha) \cdot p_0 \cdot [1 + (1 - \gamma) \cdot tx \cdot (1 - (1 - \alpha) \cdot p_0)]$
AT	$p_{AT} = (1 - \beta) \cdot p_0 \cdot [1 + (1 - \gamma) \cdot tx \cdot (1 - p_0)]$
EAT	$p_{EAT} = (1 - \alpha) \cdot (1 - \beta) \cdot p_0 \cdot [1 + (1 - \gamma) \cdot tx \cdot (1 - (1 - \alpha) \cdot p_0)]$

3. PREVALENCE-CIBLE ET CHOIX DU CRITERE DE DECISION

Les stratégies d'intervention modélisées peuvent ensuite être hiérarchisées en procédant à une analyse coût-efficacité moyenne (van der Gaag *et al.*, 2004 ; Lawson *et al.*, 2009). Dans cette analyse, la stratégie considérée comme la plus efficace sera celle pour laquelle le ratio Efficacité/Coût – autrement dit le nombre d'unités d'efficacité par euro alloué à l'intervention – est maximisé. Les coûts, notés C_i , peuvent très simplement être exprimés en coût de l'intervention i par porc produit, livré à l'abattoir et abattu. A l'instar de Fraser et Souza Monteiro (2009), l'efficacité de l'intervention pourrait être définie comme la réduction de la prévalence associée à l'intervention, obtenue en retranchant de la prévalence des carcasses à la sortie de l'abattoir en l'absence d'intervention (p_0) la prévalence des carcasses après intervention (p_i). La stratégie considérée comme la plus coût-efficace est alors la stratégie maximisant le ratio :

$$(11) \quad \frac{p_0 - p_i}{C_i} \quad \text{avec} \quad i = E, A, T, EA, ET, AT, EAT$$

L'utilisation de ce critère ne s'avère néanmoins pas totalement satisfaisante en matière de gestion de la sécurité sanitaire de l'aliment au sein d'une filière de production, puisqu'elle peut conduire à sélectionner des stratégies caractérisées par des niveaux élevés de prévalence des carcasses à la sortie de l'abattoir, et cela d'autant plus que le coût associé à ces

stratégies est faible. Afin d'illustrer le propos, considérons par exemple une prévalence à la sortie de l'abattoir en l'absence d'intervention de 50 % et deux modalités d'intervention : une intervention en élevage permettant de réduire la prévalence à 30 %, pour un coût de 0,1 €/porc, une intervention à l'abattoir permettant de réduire la prévalence à 5 %, pour un coût de 0,25 €/porc. Les ratios efficacité/coût s'élèvent ainsi dans le cas d'une intervention en élevage à $(0,5 - 0,3)/0,1$ soit une réduction de prévalence des carcasses de 2 points par euro investi et à $(0,5 - 0,05)/0,25$ soit une réduction de prévalence des carcasses de 1,8 points par euro investi dans le cas d'une intervention à l'abattoir. La hiérarchisation sur la base du ratio Efficacité-Coût moyen conduit à considérer l'intervention en élevage comme la plus intéressante au plan de sa rentabilité, même si la prévalence des carcasses obtenue à l'issue de l'intervention demeure élevée et difficilement compatible avec des objectifs de limitation des risques pour la santé publique.

Le cadre d'analyse peut toutefois être facilement réaménagé, en faisant intervenir une prévalence-cible des carcasses à atteindre à la sortie de l'abattoir, définie par exemple par les pouvoirs publics pour limiter les risques en termes de santé publique induits par la contamination des carcasses.

La hiérarchisation des stratégies d'intervention peut alors être menée en maximisant le ratio :

$$(12) \quad \frac{p^* - p_i}{C_i} \quad \text{avec} \quad i = E, A, T, EA, ET, AT, EAT$$

en notant p^* la prévalence-cible à atteindre. L'intérêt de cette reformulation tient au fait que lorsqu'une stratégie d'intervention ne permet pas d'atteindre la prévalence-cible des carcasses à la sortie de l'abattoir, l'efficacité devient négative et les stratégies concernées sont considérées comme non pertinentes et pénalisées. Il se peut néanmoins, si la valeur de la prévalence-cible est particulièrement faible, qu'aucune solution technique (ou qu'un nombre très restreint de solutions) ne soit disponible.

4. APPLICATION A LA MAITRISE DE SALMONELLA EN PRODUCTION PORCINE

4.1. Paramétrage et simulation du modèle

Le cadre général d'analyse étant posé, le modèle se doit enfin d'être paramétré. A cette fin, il convient de renseigner la prévalence en élevage en l'absence d'intervention de maîtrise (p_0), les risques de contamination post-élevage (tx), les différents paramètres d'efficacité des interventions (α , β et γ), ainsi que les coûts associés aux différentes stratégies de maîtrise considérées (élevage, transport et attente à l'abattoir, abattoir). Différents types de données sont disponibles et mobilisables. Le paramétrage du modèle peut notamment s'appuyer sur des sorties de modèles épidémiologiques (paramètres d'efficacité, risque de contamination post-élevage), ainsi que sur des données issues de la littérature ou disponibles par ailleurs, comme des résultats d'enquêtes (paramètres d'efficacité et de coût, notamment). Pour les éléments manquants, le paramétrage peut également être opéré à dire d'experts. Les données mobilisées peuvent consister soit en des valeurs moyennes, soit en des distributions de valeurs. Une fois paramétré, le modèle peut être représenté sous la forme d'un arbre de décision, la résolution de celui-ci devant permettre la hiérarchisation des stratégies d'intervention. Une analyse de sensibilité peut ensuite être menée pour identifier les paramètres influant le

plus la hiérarchisation obtenue. Des simulations mathématiques (simulations de Monte Carlo) sont ensuite réalisées, en spécifiant pour les différents paramètres des lois de distribution, afin de tenir compte de l'incertitude sur la valeur des paramètres du modèle. Ces simulations doivent ainsi permettre d'identifier la (les) stratégie(s) la(es) plus coût-efficace(s), en prenant en considération l'hétérogénéité des lots de porcs produits, livrés et abattus en termes de prévalence en l'absence intervention. Comme indiqué précédemment, certaines stratégies d'intervention peuvent en effet être coût-efficaces pour des niveaux faibles de prévalence, inefficaces pour des niveaux élevés de prévalence.

4.2. Illustration

Afin de faire ressortir l'intérêt de l'approche proposée, le propos peut être illustré sur la base d'un exemple simple. Dans cet exemple, la prévalence-cible des carcasses à la sortie de l'abattoir p^* a été fixée à 5 %. Le risque de contamination des animaux post-élevage tx a été évalué à 7 %. Le coût par porc produit, livré et abattu a été fixé à 0,45 €/porc dans le cas d'une intervention en élevage, 0,75 €/porc dans le cas d'une intervention à l'abattoir et 0,05 €/porc dans le cas de l'intervention au niveau du transport et de l'attente à l'abattoir. Afin de prendre en considération une efficacité variable des interventions, des distributions triangulaires ont été employées pour les différents paramètres d'efficacité. L'efficacité a été fixée à 0,9 dans le cas de l'intervention en élevage (plage de variation : 0,8 – 1), 0,95 dans le cas de l'intervention à l'abattoir (plage de variation : 0,9 – 1) et 0,9 dans le cas de l'intervention au niveau du transport et de l'attente à l'abattoir (plage de variation : 0,7 – 1). Enfin, la distribution de la prévalence à la sortie de l'élevage p_0 retenue dans ce modèle est celle publiée par King *et al.* (2007).

La résolution du modèle à l'aide du logiciel TreeAge Pro 2011 permet une hiérarchisation des stratégies sur la base du ratio Efficacité/Coût moyen. Les résultats obtenus font apparaître que l'intervention simultanée en élevage et à l'abattoir constitue la solution la plus économiquement intéressante, avec un ratio de 0,039. Pour cette stratégie, l'efficacité est évaluée à 4,7 % (soit une prévalence à la sortie de l'élevage de 0,3 %), pour un coût associé l'intervention de 1,2 €. Le ratio Efficacité/Coût s'établit à 0,038 dans le cas d'une intervention simultanée en élevage, durant la phase de transport et d'attente à l'abattoir, et à l'abattoir, à 0,026 dans le cas d'une intervention à l'abattoir uniquement, et à 0,025 dans le cas d'une intervention simultanée à l'abattoir et durant la phase de transport et d'attente à l'abattoir. Les trois dernières stratégies ne permettent pas d'atteindre en moyenne la prévalence-cible, le ratio efficacité/coût moyen étant négatif (-0,022 dans le cas de l'intervention simultanée en élevage et durant le transport et l'attente, -0,024 dans le cas de l'intervention en élevage uniquement, et -11,006 dans le cas de l'intervention durant le transport et l'attente uniquement).

Lorsque l'on tient compte de l'hétérogénéité des lots en termes de prévalence à la sortie de l'élevage en l'absence d'intervention (simulations de Monte Carlo, 100 000 itérations), il apparaît que l'intervention simultanée en élevage et à l'abattoir constitue la solution la plus coût-efficace dans près de 60 % des cas, l'intervention à l'abattoir dans 21 % des cas environ, l'intervention en élevage dans près de 19 % des cas, et l'intervention au niveau du transport et de l'attente à l'abattoir dans moins de 1 % des cas (figure 3).

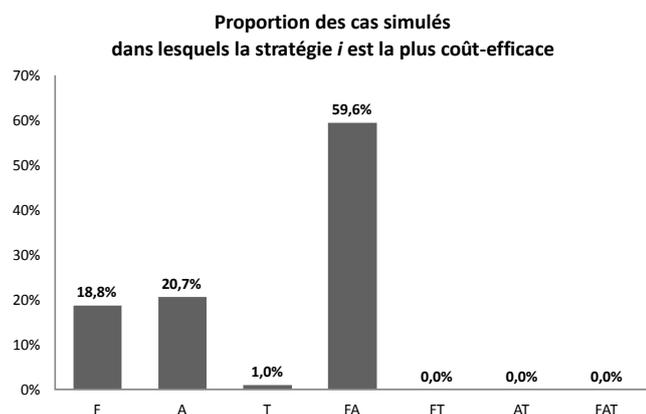


Figure 3 - Résultats de simulations

L'approche par simulation permet également d'évaluer le risque, pour chacune des stratégies considérées, de ne pas atteindre la prévalence-cible. Ainsi, dans le modèle présenté, seules deux stratégies (intervention simultanée en élevage et à l'abattoir, intervention simultanée en élevage, à l'abattoir et au niveau du transport et de l'attente à l'abattoir) sont caractérisées par des niveaux d'efficacité toujours positifs (i.e. prévalence des carcasses à la sortie de l'abattoir < prévalence-cible).

DISCUSSION ET CONCLUSION

Du fait de sa relative simplicité, le modèle développé est caractérisé par une grande flexibilité. Il peut aisément être adapté pour prendre en considération la structuration réelle de la filière, différents process d'abattage ou encore plusieurs interventions alternatives à un maillon donné de la filière. Il peut également être étendu facilement, de manière à tenir compte des interventions de décontamination mises en place lors des étapes de transformation du produit.

En comparaison avec les travaux précédents ayant utilisé une approche similaire, le modèle proposé représente de façon plus détaillée et exhaustive les différents maillons de la filière (Alban et Stärk, 2005 ; Fraser et Souza Monteiro, 2009). Le paramétrage de l'efficacité des mesures sur l'infection des porcs ou la contamination des carcasses par les salmonelles est effectué en utilisant les sorties de modèles épidémiologiques représentant la transmission des salmonelles au sein d'un troupeau (Lurette *et al.*, 2008) ou entre troupeaux au sein d'une organisation de production (Lurette *et al.*, 2011), ainsi qu'aux étapes transport /attente /abattage. Une des principales limites de cette approche réside dans le déficit de données quantitatives concernant l'efficacité des mesures de maîtrise aux différentes étapes. Ces données complémentaires sont pourtant indispensables pour valider (ou relâcher) certaines hypothèses du modèle, notamment la relation supposée ici linéaire entre les prévalences avant et après intervention. Cette approche par modélisation s'inscrit donc nécessairement en complémentarité avec des travaux d'expérimentations et/ou enquêtes, destinés à valider et améliorer le réalisme du modèle. Elle nécessite également l'élicitation d'avis d'experts. Sur le plan économique, ce type de modèle peut être utilement mobilisé dans la perspective de l'évaluation de mécanismes incitatifs (Segerson 1999 ; King *et al.*, 2007), en contribuant à l'identification de maillons cibles en matière d'intervention.

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié d'un financement de l'INRA, du Cemagref et des Conseils Régionaux de Basse-Normandie, Bretagne, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, au titre du projet Sancre, dans le cadre des programmes « Pour et Sur le Développement Régional ».

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alban L., Stärk K.D.C., 2005. Where should the effort be put to reduce the *Salmonella* prevalence in the slaughtered swine carcass effectively? *Prev. Vet. Med.*, 68, 63-79.
- Fraser R., Souza Monteiro D., 2009. A conceptual framework for evaluating the most cost-effective intervention along the supply chain to improve food safety. *Food Pol.*, 34, 477-481.
- van der Gaag M.A., Saatkamp H.W., Backus G.B.C., van Beek P., Huirne R.B.M., 2004. Cost-effectiveness of controlling *Salmonella* in the pork chain. *Food Contr.*, 15, 173-180.
- King R.P., Backus G.B.C., van der Gaag M.A., 2007. Incentive systems for food quality control with repeated deliveries: *Salmonella* control in pork production. *Eur. Rev. Agr. Econ.*, 34, 81-104.
- Lawson L.G., Jensen J.D., Christiansen P., Lund M., 2009. Cost-effectiveness of *Salmonella* reduction in Danish abattoirs. *Int. J. Food Microbiol.*, 134, 126-132.
- Lurette A., Belloc C., Touzeau S., Hoch T., Ezanno P., Seegers H., Fourichon C., 2008. Modelling *Salmonella* spread within a farrow-to-finish pig herd. *Vet. Res.*, 39, 49-60.
- Lurette A., Belloc C., Keeling M., 2011. Contact structure and pathogen control in the network of pig movements in France. *Prev. Vet. Med.*, 102, 30-40.
- Segerson K., 1999. Mandatory versus voluntary approaches to food safety. *Agribusiness*, 15, 53-70.