

# Analyse critique de la stratégie et des choix méthodologiques

---

## I. Conception et organisation du projet

Ce projet de recherche a été conçu comme un **projet pluridisciplinaire**. En effet, ces travaux allient différentes disciplines, notamment l'**épidémiologie** et les **sciences humaines et sociales**. Au sein même de l'épidémiologie, plusieurs approches ont été employées : **suivi de cohortes, modélisation à plusieurs échelles** et dans différents langages de programmation, complétés par des **essais expérimentaux**. Cette démarche pluridisciplinaire est, d'une part, cohérente avec un cursus de formation préalable qui joignait sciences dures (études vétérinaires, master de santé publique, CEAV en santé publique) et sciences molles (master de management, master de sciences politiques). D'autre part, cette approche globale de la thématique du HEV est la garantie d'une **réponse plus adaptée et plus juste à la problématique**, car la biologie des populations animales ne peut être détachée des comportements humains.

La pluridisciplinarité ne va pas sans l'inclusion de **partenaires aux compétences variées** dans le montage et le déroulement du projet. Ainsi, en plus de l'encadrement rapproché de la thèse, les travaux ont été réalisés en collaboration avec des équipes de virologie et des équipes techniques de plusieurs sites de l'Anses, un vétérinaire informaticien suédois (SVA), ainsi qu'avec une psychologue de l'université de Rennes. Le comité de suivi de la thèse a également réuni des professionnels de différentes disciplines pour bénéficier de propositions hors du cœur de notre champ de compétences. Enfin, tout au long de ce **projet multipartenarial**, nous avons également veillé à travailler en lien avec les financeurs du projet, aussi destinataires et utilisateurs finaux de nos résultats (Direction générale de l'alimentation du Ministère en charge de l'Agriculture, Interprofession Nationale Porcine), et à leur fournir des **éléments d'aide à la décision pertinents**.

En effet, le projet de thèse vise autant à apporter des connaissances scientifiques fondamentales qu'à fournir des **recommandations pratiques, réalistes et réalisables** aux

organisations publiques et privées en charge de la gestion du risque HEV. Ainsi, dans l'ensemble des études réalisées, y compris les essais expérimentaux et les approches de modélisation, nous avons tenu à dégager des **résultats connectés au terrain**. Cet attachement à la réalité du terrain s'est aussi traduit par un **ancrage territorial**, puisque toutes les données utilisées ou produites correspondent à la situation française (données de mouvement, suivi de cohortes, niveaux de prévalence des pathogènes intercurrents, *etc.*). Par ailleurs, le projet s'est focalisé sur **l'amont de la filière porcine**, dans une optique **de la fourche à la fourchette** qui met la prévention de la contamination des produits au cœur de la gestion des risques, plutôt que la gestion des produits contaminés. Les deux démarches ne sont évidemment pas mutuellement exclusives mais l'approche par l'amont correspond davantage à la stratégie sanitaire adoptée en France. Elle permet aussi de **décloisonner la santé animale et la sécurité sanitaire des aliments**, par exemple en tenant compte, dans notre cas, de l'effet majeur des pathogènes intercurrents de santé animale sur la diffusion d'un pathogène de santé publique.

En termes d'organisation pratique, le projet a été conçu plus d'un an à l'avance ce qui a permis une **planification juste et cohérente des travaux**. Les trois volets présentés dans les chapitres précédents ont été conduits en parallèle et dans un ordre dépendant de la disponibilité des données. Deux comités de suivi ont permis de dresser des bilans intermédiaires et d'apporter de nouvelles orientations. Un attachement particulier a été apporté à la **valorisation régulière** des résultats afin de diffuser les nouvelles connaissances à chaque étape du projet. Si les publications scientifiques internationales sont certainement incontournables d'un point de vue académique, nous avons aussi veillé à transmettre les résultats aux principales parties prenantes au travers d'articles en français dans des journaux scientifiques, des revues professionnelles, des fiches d'information, *etc.* Les communications orales dans des congrès nationaux et internationaux et des journées professionnelles ont également fait partie de la valorisation de nos travaux, ainsi que quelques séances d'enseignement. Dans le souci constant de rendre compte de la progression du projet à une hiérarchie géographiquement distante, des rapports annuels d'avancement et des présentations régulières ont aussi été réalisés. Finalement, cette **stratégie de valorisation ciblée et différenciée** est, selon nous, garante de l'information du plus grand nombre. Cette communication n'incluait pas les étapes aval de la chaîne de production, comme les consommateurs, qui ne sont pas directement concernés par des mesures de maîtrise du risque dans les élevages. Il serait néanmoins judicieux que les services vétérinaires départementaux, les vétérinaires officiels en abattoir et les responsables privés des abattoirs bénéficient d'informations actuelles et ciblées sur la thématique du HEV.

## II. Orientations et choix méthodologiques

Différents **niveaux de représentation** ont été adoptés dans les études précédemment présentées. **(1)** Par exemple, dans le modèle intra-troupeau, une **représentation individu-centrée** a été choisie pour représenter la diffusion du HEV dans un élevage de porcs naisseur-engraisseur. L'échelle individu-centrée permet de caractériser explicitement chaque individu du système par un ensemble de variables (âge, sexe, statut physiologique, localisation physique, *etc.*). Ainsi, notre modèle a permis d'incorporer le degré d'hétérogénéité de la population et les interactions entre individus, ainsi que de gérer les statuts infectieux de manière individuelle. Ce niveau de détail a toute son importance pour la représentation fine des co-infections par les virus immunomodulateurs à l'échelle individuelle. En revanche, dans le modèle inter-troupeaux, nous avons opté pour un moindre niveau de détails avec une **représentation à l'échelle de la case**. Ce choix découle de plusieurs raisons. D'une part, l'objectif de ce modèle est de représenter et comprendre la diffusion du HEV à l'échelle d'un territoire : pour ce faire, la simple représentation d'une dynamique intra-élevage cohérente avec les données de la littérature et les résultats du modèle intra-troupeau a été suffisante, et une représentation fine à l'échelle individuelle (comme dans le modèle intra-troupeau) n'a pas été nécessaire. D'autre part, l'échelle de la case permet de représenter la diffusion environnementale locale intra-case, telle que décrite par les études précédemment menées. Enfin, en termes d'efficacité computationnelle, une représentation plus fine était difficilement envisageable dans les délais contraints de notre projet. **(2)** Dans le dernier chapitre de la thèse mobilisant les sciences sociales, nous nous sommes également placés à deux échelles différentes. Dans la première étude, l'objectif était d'évaluer le niveau de connaissances du HEV des acteurs de la filière, et ce à l'échelle d'une **large population** d'éleveurs et de vétérinaires, considérés comme représentatifs de leur profession. A l'inverse, la seconde enquête visait à analyser en détail les freins et motivations qui, à l'échelle individuelle, seraient susceptibles d'influencer la mise en place d'un plan de lutte contre le HEV dans les élevages de porcs, d'où le choix méthodologique des **entretiens individuels**. Là encore, la stratégie du niveau de représentation a été dictée par les objectifs poursuivis.

L'une des principales caractéristiques des deux modèles développés dans ce projet est qu'ils sont **fondés sur données réelles**. **(1)** En effet, les paramètres épidémiologiques du modèle intra-troupeau dérivent majoritairement d'essais expérimentaux réalisés dans les

installations de la structure d'accueil. L'**approche expérimentale** permet l'estimation de paramètres épidémiologiques associés à un phénomène infectieux tout en contrôlant parfaitement les conditions environnementales (logement, conduite des animaux, statut sanitaire - notamment vis-à-vis des pathogènes intercurrents), ce qui limite ainsi la variabilité observée en conditions naturelles. Cet outil, dont l'utilisation a d'ores et déjà montré son efficacité dans divers travaux menés au sein du laboratoire, a permis d'estimer les paramètres de la dynamique d'infection du HEV chez des animaux exempts de pathogènes intercurrents, mais également de quantifier l'effet strictement spécifique de la co-infection par des virus immunomodulateurs. Cette forte spécificité des résultats obtenus en conditions expérimentales, combinée au faible effectif d'animaux inclus dans les expérimentations, peut néanmoins limiter l'extrapolation possible des résultats en conditions naturelles. Ceci a été contrebalancé par la réalisation d'un **suivi longitudinal individuel en conditions naturelles** sur les animaux de trois bandes dans trois élevages. Grâce à cette enquête de cohorte, les résultats obtenus en situation expérimentale ont été confirmés et d'autres effets individuels (sexe, parité de la truie) ont été mis en évidence. Cette étude a également montré l'effet additif des co-infections par le virus du SDRP et le PCV2, ce qui aurait pu être intéressant de tester en conditions expérimentales pour quantifier l'impact d'une triple infection, fréquemment rencontrée sur le terrain. Il convient aussi de noter que, pour les études observationnelles, les résultats observés reposent sur une notion probabiliste d'augmentation d'un risque, sans possibilité de mettre en évidence une relation causale comme c'est le cas dans le cadre d'expérimentations animales.

(2) De la même manière, le modèle inter-troupeaux repose sur des données réelles, puisque les paramètres épidémiologiques sont les mêmes que dans le modèle intra-troupeau, et les paramètres démographiques ont été adaptés à partir des données de mouvements enregistrées dans la base de données nationale BDporc. Ceci permet donc une **représentation explicite des échanges de porcs**, plutôt que d'inclure dans le modèle inter-troupeaux un réseau théorique. Notons néanmoins que, si la démographie inter-élevages repose bien sur des données réelles, elle a été simplifiée et approchée de manière probabiliste, qui ne permet pas de prendre en compte l'évolution des échanges dans le temps de manière fine. De plus, la démographie intra-élevage a elle aussi été standardisée (taille des élevages, type de conduite), ce qui ne permet pas d'explorer certains facteurs de variation des conditions réelles.

Une autre spécificité de ce projet est de proposer des **méthodes à la fois théoriques et appliquées** à la thématique d'intérêt pour en dégager des résultats. (1) Par exemple, le modèle intra-troupeau multi-pathogènes que nous avons développé peut être vu comme un **cadre**

**conceptuel et méthodologique adaptable** à la diffusion conjointe d'autres pathogènes. C'est une méthode particulièrement originale et innovante puisqu'elle permet de prendre en compte, de manière stochastique, quantitative et individualisée, les interactions entre deux pathogènes, ce qui, à notre connaissance, n'est actuellement pas décrit dans la littérature. Au-delà de son utilité théorique, cette méthode nous a permis de répondre de manière pertinente et ciblée à la problématique de ce volet de la thèse en dégagant des facteurs explicatifs de la dynamique d'infection par le HEV dans un élevage naisseur-engraisseur dont les animaux peuvent être infectés par des pathogènes intercurrents. (2) De même, nous avons présenté dans le chapitre II de ce manuscrit des méthodes génériques appliquées au HEV. Ainsi, les données de mouvements de porcs ont été modélisées sous la forme de deux types de réseaux : l'un prenant en compte uniquement la transmission de pathogènes par le transfert d'animaux infectés d'un élevage à un autre, l'autre intégrant en sus la possibilité d'une contamination vectorielle mécanique par le seul passage d'un camion de transport dans un élevage sans introduction d'animaux. Si le premier réseau est adapté à la problématique du HEV et a ainsi fondé la structure du modèle inter-troupeaux, le second pourra à l'avenir être utilisé pour l'étude d'autres pathogènes porcins, comme les virus de la diarrhée épidémique porcine ou de la peste porcine africaine. (3) De plus, le modèle inter-troupeaux que nous avons développé a représenté un défi méthodologique et informatique certain et cette approche complexe n'avait jusqu'à ce jour pas été utilisée dans une filière de production porcine. En ce sens, nous avons conçu le modèle de telle sorte qu'il puisse être facilement adapté dans des travaux futurs pour explorer la transmission entre fermes, ou l'introduction dans un territoire indemne, d'autres agents d'intérêt pour la filière porcine, comme le virus de la peste porcine africaine. Néanmoins, en l'état, notre modèle inter-troupeaux pêche par son manque de souplesse, notamment pour effectuer des manipulations du réseau, simulant par exemple des restrictions dans les échanges de mouvements d'animaux, qui seraient nécessairement imposées dans le cas d'une maladie règlementée comme la peste porcine africaine. (4) Enfin, le chapitre IV du présent manuscrit s'attache à la mise en place pratique des mesures de maîtrise dégagées, c'est-à-dire à l'évaluation de leur faisabilité et de leur acceptabilité par l'ensemble des acteurs concernés, **phase finale indispensable dans la conception d'un plan de lutte**. L'originalité de ce volet est d'allier **différentes méthodes d'enquête sociologique** : questionnaire quantitatif diffusé par voie électronique à une large population représentative, entretiens semi-directifs auprès d'un petit échantillon d'acteurs à une échelle locale, approche participative avec une réunion de concertation collective de représentants d'organisations publiques et privées évaluateurs et gestionnaires du risque. Faute de temps, les acteurs de l'abattage (notamment responsables

qualité des abattoirs et services vétérinaires d'inspection) n'ont pas été inclus dans l'échantillon des entretiens semi-directifs, mais les représentants de l'aval de la chaîne de production porcine étaient présents à la réunion de concertation et ont ainsi pu faire émerger de nouvelles orientations possibles sur la gestion de cette problématique à l'abattoir.

Au bilan, nous nous sommes efforcés, tout au long de ce projet de recherche, de proposer des **contributions méthodologiques innovantes et adaptables** et qui permettent, en même temps, de dégager des **éléments de réponse scientifiques et pragmatiques** à la problématique spécifique du HEV.

## **PARTIE 5.2. Discussion des principales conclusions et mise en perspective du projet de recherche**

---

### **I. Contribution à la compréhension et à la maîtrise de l'infection par le virus de l'hépatite E dans les élevages de porcs**

Ce projet de recherche a contribué à l'acquisition de nouvelles connaissances relatives à la dynamique de l'infection par le HEV dans la filière porcine. Tout d'abord, le volet intra-élevage de la thèse a permis de fournir des **éléments d'explication de la variabilité de la dynamique d'infection** qui prennent en compte à la fois la structure de l'exploitation, les pratiques d'élevage et la situation sanitaire. Le suivi longitudinal sur le terrain a permis d'objectiver la variabilité inter-bandes et inter-élevages, de mettre à jour de nouveaux facteurs individuels de variation qui n'avaient pas été rapportés dans la littérature jusqu'ici (sexe, parité de la truie) et de quantifier le rôle des virus immunomodulateurs sur l'infection par le HEV. De manière quasi-concomitante à la publication de nos travaux, l'équipe de Krog *et al.* (2019) a également réalisé un suivi longitudinal pour étudier la dynamique de l'infection par le HEV dans un élevage unique. Si cette enquête apporte quelques éléments additionnels concernant l'effet de l'immunité maternelle, cohérents avec la littérature déjà publiée, elle reste néanmoins assez descriptive et ne met pas en évidence d'autres facteurs de variation de la dynamique d'infection. En complément de notre étude longitudinale, nous avons conduit deux essais expérimentaux (l'un avant la thèse, l'autre pendant la thèse) qui ont **confirmé et quantifié l'impact des pathogènes intercurrents** (virus du SDRP, PCV2) sur la dynamique d'infection et sur le risque HEV pour la santé publique. Parallèlement à nos travaux, l'étude de Jackel *et al.* (2019) a également suggéré l'existence d'une corrélation entre l'infection par le HEV et celle par le PCV2. Grâce à notre approche expérimentale, nous avons aussi mis en évidence la présence du HEV dans le sang et les muscles de porcs co-infectés par le virus du SDRP, ce qui apporte de nouveaux éléments d'analyse sur la question d'un **éventuel risque HEV lié à la consommation de produits à base de porc ne contenant pas de foie**. Le modèle que nous

avons développé à la suite de ces études contribue à une vision plus globale de l'infection par le HEV dans un élevage naisseur-engraisseur, ce type d'élevage représentant plus d'un tiers des exploitations porcines françaises. C'est le premier modèle de ce type publié à ce jour, **alliant dynamique démographique et dynamique infectieuse, de surcroît multi-pathogènes**. A partir de ce modèle, nous avons notamment montré que le type de conduite en bandes et le mode de logement des truies en gestation avaient un impact majeur sur les caractéristiques de diffusion du HEV, avec une augmentation du risque HEV en lien avec l'intensification de la conduite et l'allotement des truies en grands groupes. La modification de ces deux facteurs n'a pas été testée en tant que mesures de maîtrise, car ce ne sont pas des pratiques à proprement parler mais bien des éléments structurels de l'exploitation : il est par exemple impensable qu'un éleveur modifie son type de conduite en bandes du seul fait d'un risque HEV plus élevé (même si des changements de type de conduite en bandes sont réalisés en pratique pour d'autres motifs, telles que l'organisation du travail ou des raisons sanitaires). Mais ces deux indicateurs peuvent néanmoins permettre de **caractériser les élevages selon leur niveau de risque** et d'exercer ainsi une vigilance accrue sur certains types d'exploitations ; cela pourrait alors participer de la conception d'une **stratégie de surveillance ciblée, fondée sur le risque**. Par la mise en lumière d'autres facteurs de variation de la dynamique de l'infection par le HEV, le modèle a également permis de dégager des **pistes de maîtrise du HEV** au sein d'un élevage, tant de nature zootechnique que sanitaire, corroborées par des données de terrain : réduction des adoptions, meilleure gestion des mélanges de porcs en croissance, éradication ou contrôle vaccinal des pathogènes intercurrents. Ces stratégies représentées et évaluées dans le modèle intra-troupeau correspondent à des **mesures réalistes** que les éleveurs pourraient mettre en place dans leur élevage. Certaines stratégies qui ne pourraient être développées pour des raisons économiques ou techniques n'ont délibérément pas été représentées, comme une vaccination anti-HEV. Les résultats que nous avons obtenus dans cette partie du projet constituent des pistes pertinentes de maîtrise du HEV.

Mais une gestion globale du HEV dans la filière porcine ne saurait être envisagée à l'échelle stricte des élevages pris isolément. En effet, nos travaux préliminaires ont permis de mettre en évidence l'impact des échanges d'animaux sur le risque de positivité HEV des élevages, et donc l'importance de prendre en compte ces mouvements pour comprendre la dynamique du HEV dans la filière. Ainsi, le modèle que nous avons développé par la suite à l'échelle territoriale a révélé des **différences de patterns de diffusion spatiale du HEV** selon le type d'élevage d'introduction. Bien que le haut de la pyramide de production porcine soit

souvent considéré, à raison, comme un maillon ayant un effet majeur sur la situation sanitaire globale de la filière, nous avons ici montré que la problématique du HEV était sensiblement plus complexe, et qu'au type d'exploitation devait être associé le statut sanitaire de l'élevage vis-à-vis des pathogènes immunomodulateurs pour une compréhension fine de la dynamique du HEV à l'échelle d'une population d'élevages. En faisant varier la proportion d'élevages de production infectés par des virus intercurrents, nous avons pu confirmer le rôle crucial de ces derniers, à l'échelle plus globale d'un territoire cette fois-ci, et ainsi souligner une nouvelle fois la nécessité de renforcer les programmes d'éradication ou de contrôle de ces co-infectants. Le modèle que nous avons développé, qui a le mérite d'être particulièrement novateur, reste néanmoins encore **expérimental**. En effet, si nous avons exploré la diffusion du HEV dans une communauté d'élevages, nous ne nous sommes pas placés dans une situation réaliste correspondant au contexte français actuel : nous avons simulé une introduction unique du HEV dans un cluster d'élevages indemnes du HEV, alors qu'à ce jour 65 % des élevages français sont séropositifs et qu'il est fort probable que les introductions d'animaux infectés par le HEV soient multiples. **Les résultats obtenus sont donc théoriques et ne peuvent être extrapolés tels quels en conditions réelles**. Ils donnent également des indications sur les principaux éléments conduisant à une diffusion ou non dans une population d'élevages, de manière à évaluer l'effet relatif de certaines conditions sur le potentiel de diffusion par rapport à d'autres, sans établir des prédictions strictes et absolues. Ils permettent également d'évaluer le risque que représenterait l'introduction du HEV dans une potentielle filière spécifique labellisée « HEV-free ».

Au bilan, cette approche multi-échelles de la diffusion et la persistance du HEV a permis de proposer un plan d'action pour réduire le risque de présence de produits porcins contaminés dans la chaîne de production. Ces pistes de maîtrise, formulées sous cinq axes complémentaires (élevage, filière, surveillance, communication, recherche), ont été soumises à l'avis des parties prenantes afin de garantir leur faisabilité de mise en place. A l'issue d'une réunion de concertation avec ces acteurs, **15 pistes d'action** ont finalement été retenues. L'enquête individuelle que nous avons conduite auprès d'éleveurs, de techniciens d'élevage et de vétérinaires a quant à elle permis de mettre en évidence un certain nombre de facteurs qui pourraient limiter la mise en place effective d'un plan de lutte et de dégager des leviers pour motiver les acteurs. Fournir de tels éléments aux gestionnaires du risque permettra de veiller à **créer un contexte favorable** à la mise en place d'un programme de lutte contre le HEV dans la filière porcine.

## II. Pistes de maîtrise du risque lié au virus de l'hépatite E dans la filière porcine

Plusieurs mesures de maîtrise ont été proposées dans les chapitres précédents de la thèse, et notamment dans les rapports d'aide à la décision. A ce stade, **des préconisations aux éleveurs et à leurs accompagnants peuvent être prudemment formulées**. S'il est sûrement trop tôt pour fournir des conseils très spécifiques, il convient d'insister une nouvelle fois sur des **recommandations générales de biosécurité externe et interne** (présence et utilisation correcte d'un sas sanitaire, nettoyage et désinfection efficaces des installations, *etc.*). La **réduction des adoptions et des mélanges des porcs en croissance** doit également être favorisée, de même que la **maîtrise des pathogènes intercurrents**. A l'échelon des élevages, une **stratégie de surveillance fondée sur le risque** pourrait être développée, en ciblant les élevages à risque selon leur localisation géographique, l'intensité de leurs échanges commerciaux de porcs, leur taille, leur type de conduite en bande, le type d'installations pour le logement de leurs truies gestantes, leur type de production. La surveillance « aval » pourrait également être fondée sur le risque, en **incluant le HEV dans les prochains plans de surveillance et de contrôle (PSPC) annuels sur carcasses, abats et produits transformés** et en ciblant les produits à surveiller selon le niveau de risque de leur élevage d'origine et/ou le niveau de risque qu'ils présentent pour le consommateur (fonction des ingrédients, du mode de cuisson, *etc.*). Ces PSPC HEV permettraient de suivre l'évolution des niveaux de contamination des produits et de détecter la présence éventuelle du virus dans de nouveaux produits.

En plus de ces réflexions à l'échelle individuelle (des animaux, des produits, des élevages), nos résultats ont montré qu'il serait possible d'envisager la **structuration d'une filière spécifique** permettant aux élevages reconnus indemnes de HEV de fournir des foies sains pour la fabrication des produits à risque. Ceci permettrait de répondre aux exigences sanitaires spécifiques d'un marché restreint, de niche - celui des produits contenant du foie de porc et susceptibles d'être consommés crus ou insuffisamment cuits - tout en n'engageant des mesures de maîtrise que dans un nombre limité d'élevages. Ceci permettrait de garantir un haut niveau de sécurité sanitaire tout en appliquant des **principes pragmatiques et rationnels de parcimonie** et en veillant à **une utilisation judicieuse et raisonnée des ressources publiques et privées**. La sélection des élevages indemnes ou souhaitant devenir indemnes devrait alors se faire selon les facteurs de risque énoncés ci-dessus. Néanmoins, la mise en place d'une telle

démarche de segmentation nécessiterait au préalable (i) le **développement de tests** rapides et peu onéreux à l'abattoir ; (ii) de **connaître l'évolution dans le temps du statut des élevages** et de quantifier le risque pour un élevage de perdre son statut indemne ; (iii) d'acquérir davantage de données quant à la **contamination possible du sang et de la viande** de porcs infectés par le HEV ; (iv) de mettre en place une **traçabilité rigoureuse** à tous les échelons de la filière ; (v) de prévoir une **stratégie commerciale adaptée**, avec probablement une rémunération appropriée des éleveurs s'engageant dans cette qualification. Ceci participerait donc d'une **politique globale de filière**. Dans un contexte économique mondial très concurrentiel et face à des pays « gros » producteurs, miser sur cette **qualité sanitaire** serait en parfaite cohérence avec les stratégies actuelles de **démarquage commercial sur des signes de qualité**.

La mise en place d'un plan de lutte contre le HEV nécessite de **définir les responsabilités et les actions respectives du secteur public et du secteur privé**. A ce jour, **aucune réglementation spécifique** n'existe concernant le HEV dans la filière porcine. De manière générale, il appartient aux professionnels de **garantir la mise sur le marché de produits propres à la consommation humaine**, c'est-à-dire (entre autres) ne présentant pas de risque pour la santé humaine (Anonyme, 2002). Le règlement (CE) n° 2160/2003 rappelle aussi qu'il « importe que la responsabilité principale en matière de sécurité alimentaire incombe aux exploitants des secteurs de l'alimentation humaine et de l'alimentation animale » (Anonyme, 2003). Ils s'appuient pour cela sur leur **plan de maîtrise sanitaire** (PMS) qui comprend notamment les mesures d'application des **bonnes pratiques d'hygiène** (BPH), ainsi que les mesures de maîtrise définies dans le cadre d'une analyse HACCP (*Hazard Analysis – Critical Control Point*). Les professionnels peuvent également décider de renforcer le dispositif de maîtrise d'un pathogène par des initiatives allant plus loin que la réglementation en mettant en place des **chartes qualité d'application volontaire** et des **outils de surveillance renforcée**. En tant qu'agent zoonotique, le HEV peut aussi être considéré comme faisant partie de la **responsabilité sociétale des entreprises** (RSE)<sup>27</sup>. Le guide de l'Association Nationale des Industries Agro-alimentaires (ANIA) indique par exemple dans la catégorie « protection de la santé et de la sécurité des consommateurs » que l'entreprise se doit d'anticiper les évolutions

---

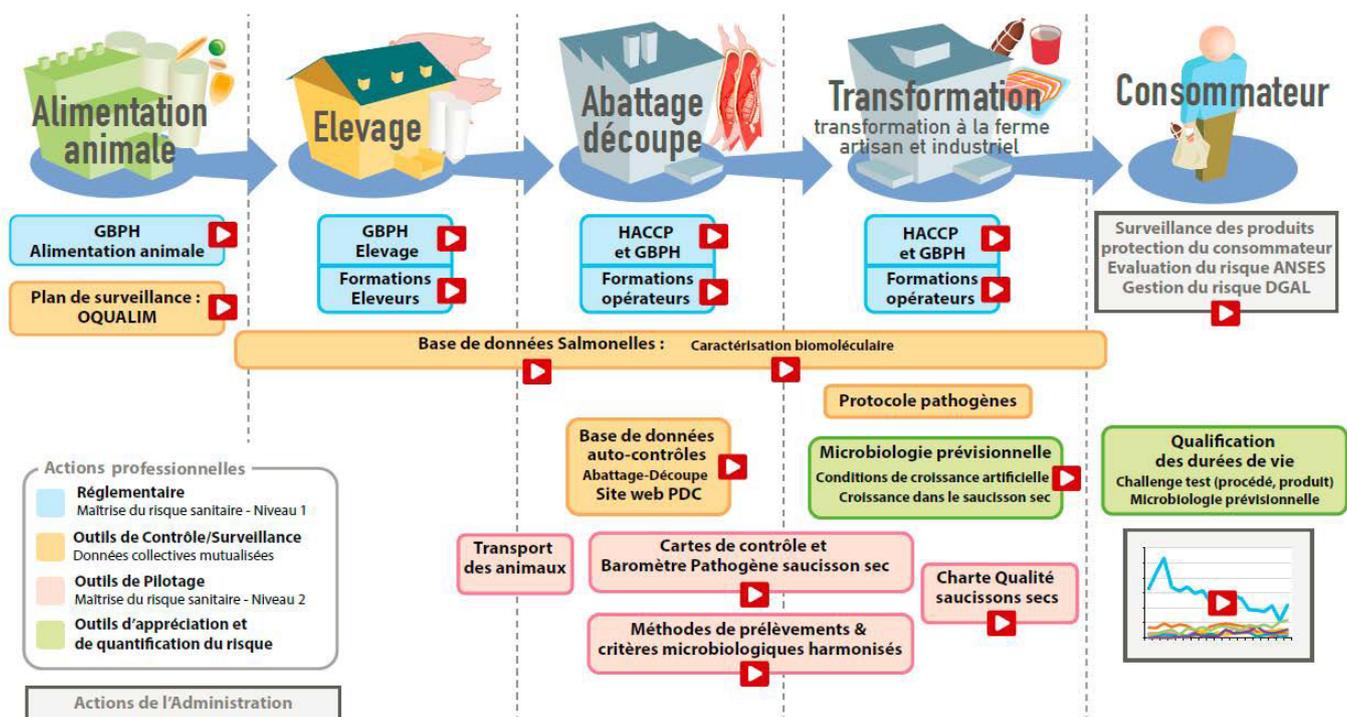
<sup>27</sup> La responsabilité sociétale des entreprises (RSE) désigne la prise en compte par les entreprises, sur base volontaire, des enjeux sociaux et éthiques dans leurs activités.

réglementaires, d'être dans une démarche d'amélioration continue et d'adopter un mode proactif sur cette thématique<sup>28</sup>.

A titre d'exemple, la problématique de la gestion du HEV peut être comparée à celle de ***Salmonella* dans la filière porcine**, pour laquelle un dispositif de maîtrise existe (Figure 28). Les objectifs et modalités du contrôle de *Salmonella* sont définis dans le règlement européen (CE) n°2160/2003 sur le contrôle des salmonelles et d'autres agents zoonotiques spécifiques présents dans la chaîne alimentaire (Anonyme, 2003). Ainsi, chaque Etat membre doit atteindre des objectifs de réduction de la contamination des élevages de porcs (entre autres) dans un délai fixé par le règlement. Pour atteindre ces objectifs communautaires, les États membres établissent des programmes de contrôle nationaux pour *Salmonella*. Par ailleurs, en plus des bonnes pratiques d'hygiène appliquées en élevage et chez les fabricants d'alimentation animale, l'aval de la filière met également en place des mesures de maîtrise du danger, conformément aux exigences réglementaires fixées par le Paquet Hygiène. Les exploitants doivent notamment définir un plan d'autocontrôles qui s'intègre dans une démarche préventive de la maîtrise de la sécurité et la salubrité de ses fabrications. Pour ce qui relève des analyses microbiologiques des aliments, les professionnels doivent *a minima* intégrer, dans leur plan d'autocontrôles, les microorganismes pour lesquels des critères sont définis dans le règlement (CE) n°2073/2005. Dans ce règlement, les salmonelles sont considérées comme un critère de sécurité de certaines denrées d'origine animale (viande hachée, préparation de viande, denrées alimentaires prêtes à être consommées, *etc.* : absence dans 25 grammes), ou comme un critère d'hygiène des procédés d'abattage des porcs (absence dans la partie de la carcasse examinée). En plus de ces obligations réglementaires, les professionnels peuvent aller plus loin en s'engageant dans des chartes d'application volontaire, telle que la charte « Saucisson sec » qui s'intéresse spécifiquement au risque Salmonelles.

---

<sup>28</sup> ANIA, mars 2015. Kit RSE – Grilles d'évaluation. Disponible à : [https://www.ania.net/wp-content/uploads/2015/07/KIT-RSE-ANIA-ACTIA-3.-Grilles\\_dévaluation\\_v.mars\\_20151.pdf](https://www.ania.net/wp-content/uploads/2015/07/KIT-RSE-ANIA-ACTIA-3.-Grilles_dévaluation_v.mars_20151.pdf)



**Figure 28** - Dispositif de maîtrise des Salmonelles dans la filière porcine française

Source : d'après IFIP, INAPORC<sup>29</sup>

Un dispositif de maîtrise similaire pourrait être envisagé pour le cas du HEV. En ce qui concerne la surveillance et le contrôle encadrés par les services de l'Etat, il serait envisageable que le HEV entre dans les **prochains PSPC annuels** réalisés par le Ministère en charge de l'Agriculture au titre du règlement (CE) n°2060/2003, comme cela avait été le cas en 2011. Le HEV pourrait également être un sujet d'intérêt pour la récente **plateforme de Surveillance de la Chaîne Alimentaire** qui a pour objectif d'optimiser les dispositifs de surveillance mis en œuvre tout au long de la chaîne alimentaire en mettant en place des actions concertées entre les différents acteurs du secteur agro-alimentaire. Dans le cadre du règlement (CE) n°2073/2005, le HEV pourrait aussi être considéré comme **critère de sécurité** dans certains produits, par exemple le foie ou produits à base de foie. Dans le cadre d'une adaptation des méthodes d'inspection des viandes, il serait également intéressant de développer des **indicateurs épidémiologiques harmonisés** (*harmonised epidemiological indicators*<sup>30</sup>) permettant de

<sup>29</sup> IFIP, INAPORC, 2018, Dispositif de maîtrise des Salmonelles dans la filière porcine française. Disponible à : [https://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/ref\\_salmonelle\\_2018\\_m.pdf](https://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/ref_salmonelle_2018_m.pdf)

<sup>30</sup> "An epidemiological indicator is defined as the prevalence or incidence of the hazard at a certain stage of the food chain or an indirect measure of the hazards that correlates to human health risk caused by the hazard.", EFSA, 2011.

caractériser des élevages et/ou des abattoirs sur leur niveau de risque vis-à-vis du HEV, comme cela a été proposé par l'EFSA pour d'autres pathogènes comme *Salmonella* et *Trichinella*<sup>31</sup>. Par exemple, le danger *Trichinella* est géré à l'abattoir grâce à l'indication, sur la fiche d'Information sur la Chaîne Alimentaire (ICA), de l'une des trois mentions HRT (Hébergement Reconnu Trichine), HNRT (Hébergement Non Reconnu Trichine) ou PA (Plein Air). Selon la mention indiquée, les modalités de prélèvements sur les carcasses sont différentes<sup>32</sup>. Concernant le HEV, la catégorisation des élevages se fonderait notamment sur les facteurs de risque identifiés dans la littérature et dans notre projet de recherche, celle des abattoirs porterait sur leur capacité à détecter les foies contaminés et/ou à garantir la traçabilité de lots reconnus indemnes de HEV.

Ces engagements des services de l'Etat ne sauraient se substituer à une **implication forte du secteur privé**, de l'élevage à la distribution, en passant par l'abattage/découpe et la transformation, dans la mise en place de toutes les mesures nécessaires pour réduire le risque d'exposition humaine au HEV et ainsi favoriser le développement de **chartes qualité d'application volontaire pour les acteurs du marché « foie » de la filière porcine, qui doivent veiller à la qualité microbiologique de leurs matières premières.**

---

<sup>31</sup> European Food Safety Authority, 2011. Scientific Report of EFSA. Technical specifications on harmonised epidemiological indicators for public health hazards to be covered by meat inspection of swine. EFSA Journal 2011; 9(10): 2371

<sup>32</sup> Instruction technique DGAL/SDSSA/2018-551 du 23 juillet 2018 relative à la mise en œuvre par les services vétérinaires d'inspection des règles applicables aux contrôles officiels concernant la présence de *Trichinella* dans les viandes.

### III. Perspectives de recherche sur la thématique du virus de l'hépatite E

Les résultats obtenus au cours de ce projet et les perspectives envisagées suscitent de nouvelles questions et hypothèses, nécessitant idéalement des études complémentaires pour y répondre. Tout d'abord, le modèle intra-troupeau développé pourrait faire l'objet d'**adaptations** et d'**extensions**. Par exemple, la diffusion du HEV dans des élevages avec d'**autres types de conduite en bandes** (actuellement implémentés dans le modèle mais non analysés) pourrait être étudiée. Le modèle pourrait également être modifié de manière à tester l'influence de **mesures de biosécurité** (efficacité des procédures de nettoyage-désinfection, présence et utilisation correcte d'un sas, modalités de quarantaine, *etc.*). Il serait également judicieux de pouvoir **modifier les pratiques d'élevage en cours de simulation**, de manière à simuler la mise en place de nouvelles pratiques dans un élevage infecté, contrairement à la situation actuelle où nous avons simulé l'introduction du HEV dans différentes configurations d'élevage, sans modification ultérieure de cette structure et des pratiques. Un **nouvel essai** pourrait également être conduit afin de quantifier l'**impact d'une triple infection HEV/SDRP/PCV2** sur la dynamique de l'infection par le HEV (comme observé dans le suivi longitudinal des trois élevages) et ainsi paramétrer cette modalité dans le modèle intra-troupeau. Le modèle peut également être paramétré de manière à représenter plus spécifiquement l'effet d'un pathogène donné, plutôt que celui d'un virus immunomodulateur générique. Enfin, dans une perspective plus lointaine, il serait envisageable de développer, à partir du modèle, un outil d'aide à la décision qui s'adapterait précisément à des typologies d'élevage pour évaluer leur risque et faire le lien avec les stratégies de surveillance et de qualification des élevages.

Le modèle intra-troupeau pourrait également **inclure des composantes économiques et sociales**. Ainsi, la **dynamique comportementale** des éleveurs pourrait être modélisée et incorporée à la dynamique infectieuse, en prenant en compte les **interactions réciproques** entre elles (Hidano *et al.*, 2018). Par exemple, des études ont montré que la diminution de la prévalence d'un danger réduisait la perception du risque par les éleveurs : c'est notamment le cas des éleveurs de chevaux qui vaccinent leurs animaux contre le virus Hendra et veillent alors moins aux bonnes pratiques d'élevage, du fait de leur confiance en la vaccination (Wiethoelter *et al.*, 2017). Les pratiques d'un éleveur n'apparaissent donc pas comme un facteur figé dans le temps et cette évolution pourrait être prise en compte dans les approches de modélisation. Une

**analyse coût-bénéfice** pourrait également être réalisée, en comparant le coût des mesures mises en place avec le bénéfice (sanitaire, économique) pour la santé humaine et la filière.

De plus, il serait nécessaire de conduire une **étude d'intervention en élevage** afin de tester en conditions réelles l'efficacité des mesures de maîtrise dégagées du modèle. La réalisation de ce type d'étude est particulièrement lourde, chronophage et coûteuse. En effet, cela nécessite en premier lieu de trouver des élevages HEV-positifs, ayant des pratiques ou configurations à risque, et volontaires pour modifier une ou plusieurs de leurs pratiques. Après un bilan initial de leur situation sanitaire vis-à-vis du HEV, il faudrait suivre l'évolution de la prévalence HEV de manière régulière et sur un pas de temps suffisamment long. C'est la raison pour laquelle il nous a semblé pertinent d'évaluer en premier lieu la faisabilité des stratégies de maîtrise identifiées à partir du modèle, afin de ne tester sur le terrain que les mesures réalistes. Dans l'objectif de développer un système d'aide à la décision pour une surveillance fondée sur le risque (*cf. supra*), il serait aussi intéressant de pouvoir **catégoriser les élevages sur leur niveau de risque**. Cette catégorisation pourrait servir à (i) mettre en place des mesures de maîtrise adaptées selon le niveau de risque des élevages ; (ii) approvisionner la filière « foie » par des élevages à faible niveau de risque ; (iii) suivre l'évolution dans le temps de la situation sanitaire des élevages de porcs. A ce stade, il est sûrement prématuré de proposer des critères de catégorisation des élevages mais quelques suggestions pourraient découler des facteurs de risque mis en évidence dans la littérature et notre projet. D'autres études de terrain seraient également nécessaires pour, par exemple, évaluer la situation sanitaire dans les **élevages de sélection et de multiplication** et analyser la dynamique de l'infection par le HEV dans les **élevages alternatifs** de porcs (agriculture biologique ou sous label de qualité impliquant un élevage des porcs sur litière et un accès à l'extérieur) qui, d'après la littérature, semblent plus à risque que les élevages conventionnels.

Quant au **modèle inter-troupeaux** que nous avons conçu, il devra nécessairement être **complexifié** afin (i) d'inclure différents types de conduite en bandes et différentes tailles d'élevage ; (ii) de tester des modifications de pratiques d'élevage et de biosécurité ; (iii) de permettre des adaptations du réseau simulant par exemple des restrictions de mouvements ou une réorganisation de la filière. La mise en place d'une démarche collective dans la filière pourrait également être intégrée dans un modèle, avec une uniformisation des mesures appliquées dans un sous-groupe d'élevages.

Concernant l'aval de la filière, il apparaît primordial d'acquiescer davantage de **données relatives à la contamination des viandes de porc et produits à base de viande ne contenant pas de foie** afin d'évaluer et de gérer correctement le risque d'exposition humaine. Pour ce faire, une nouvelle enquête pourrait être réalisée dans des abattoirs, mais cette fois-ci en ciblant l'échantillonnage sur le niveau de risque présenté par les éleveurs et en prélevant les mêmes muscles que ceux analysés dans l'essai de transmission HEV/SDRP que nous avons réalisé. Par ailleurs, l'**efficacité des traitements de séchage et de salaison** des produits à base de porc devrait être évaluée. Ceci pourrait être réalisé en conditions expérimentales : par exemple, il serait envisageable de répéter l'essai de transmission HEV/SDRP, de collecter des muscles contenant du HEV, d'utiliser ces pièces pour fabriquer de la charcuterie (saucisson, jambon sec), de leur appliquer le processus de transformation habituellement employé par les professionnels de la charcuterie-salaisonnerie et de tester leur statut vis-à-vis du HEV à l'issue de la période de séchage-salaison. Dans l'éventualité où du HEV serait détecté à la fin de l'expérimentation, il serait également nécessaire de **confirmer le caractère infectieux** des particules virales présentes (par un bio-essai ou des modèles *in vitro*). L'ensemble de ces résultats permettrait de réaliser une **analyse quantitative des risques** incluant des données de contamination des produits et des données de consommation de ces produits par les Français. A titre de comparaison, l'EFSA (*European Food Safety Authority*) a développé des modèles d'analyse quantitative des risques concernant *Salmonella* chez le porc et *Campylobacter* chez le poulet de chair, qui se sont révélés être des outils utiles aux gestionnaires du risque dans l'évaluation de la faisabilité et du ratio coût/bénéfice de la mise en place de mesures de maîtrise de ces deux pathogènes zoonotiques (Romero-Barrios *et al.*, 2013). Toujours au sujet de l'aval de la filière, une **enquête similaire** à celle conduite auprès des éleveurs, conseillers d'élevage et vétérinaires pourrait être réalisée **auprès des professionnels de l'abattage, de la transformation et de la distribution** pour évaluer la faisabilité de mesures de lutte contre le HEV dans ces maillons de la filière.