



innovations agronomiques

n°113 / juin 2026

Élevages durables respectueux de la santé & du bien-être des animaux

Concevoir des élevages favorisant la santé et le bien-être animal est un pari gagnant pour les éleveurs et une réponse aux attentes des citoyens. Dans ce numéro, nous aborderons plusieurs questions : Quelles synergies et tensions entre bien-être et santé ? Quels impacts des pratiques favorisant la relation adulte-jeune ? Comment les initiatives associant les parties prenantes permettent de faire évoluer la conception d'élevages plus durables ? Comment valoriser ces pratiques dans les filières de production ? Ce numéro vient compléter les apports du Carrefour de l'Innovation organisé par INRAE, VetAgro Sup, Agreenium, le GIS Avenir Élevages, l'Ifip, l'Itavi et Idele le 27/11/2025.





Innovations Agronomiques

Volume 113 – Juin 2026

Élevages durables respectueux de la santé et du bien-être des animaux

Concevoir des élevages favorisant la santé et le bien-être animal est un pari gagnant pour les éleveurs et une réponse aux attentes des citoyens. Dans ce numéro, nous aborderons plusieurs questions : Quelles synergies et tensions entre bien-être et santé ? Quels impacts des pratiques favorisant la relation adulte-jeune ? Comment les initiatives associant les parties prenantes permettent de faire évoluer la conception d'élevages plus durables ? Comment valoriser ces pratiques dans les filières de production ? Ce numéro vient compléter les apports du Carrefour de l'Innovation organisé par INRAE, VetAgro Sup, Agreenium, le GIS Avenir Élevages, l'Ifip, l'Itavi et Idele le 27/11/2025.

Directeur de la publication : Philippe Mauguin, Président directeur Général INRAE

Rédaction en chef : Christian Huyghe, Chargé de mission à la Direction Scientifique Agriculture INRAE, et Isabelle Litrico, Directrice Scientifique Agriculture INRAE

Coordination éditoriale : Aurélie Gauguery, Responsable des Carrefours de l'Innovation INRAE

Comité scientifique : Claire Rogel-Gaillard, Sophie Thoyer et Christian Lannou, Directrices et directeur scientifiques Agriculture adjoints ; Sophie Nicklaus, Directrice scientifique Alimentation et bioéconomie adjointe ; Alban Thomas et Pierre Renault, Directeurs scientifiques Environnement adjoints, INRAE ; Nathalie Munier-Jolain, Directrice générale déléguée à la science et à l'innovation adjointe, INRAE ; Isabelle Pion, Chargée de mission agroécologie et transition des systèmes agricoles, Direction de l'Appui aux Politiques Publiques, INRAE ; Marianne Sellam, Directrice scientifique et technique, ACTA, Luc Mounier, Enseignant-chercheur, VetAgro Sup ; Nicolas Brault, Directeur adjoint de l'unité de recherche Interact, Institut Polytechnique UniLaSalle ; Alessia Lefébure, Directrice, Sciences Po Aix.

Coordination scientifique du numéro : Xavier Fernandez, Co-animateur Métaprogramme Sanba, Chef Dpt Phase ; Christian Ducrot : Responsable Méta programme Sanba, Chef Dpt adjoint SA ; Belen Barrio & Lise Poulet–cheffe(s) projet Sanba, Cellule SA ; Sandrine Petit – membre du Comité de Pilotage (CoPil) de Sanba ; Camille Billion – René Baumont - GIS Avenir Elevages ; Elsa Denoue – sociologue à l'Institut technique (IFIP – IDELE – ITAVI - ITAB) – excusée ; Luc Mounier – professeur en bien-être animal, responsable de la chaire bien-être animal à VetAgro Sup

Initiée en 2007, la revue de transfert Innovations agronomiques a pour ambition de diffuser les savoirs et de favoriser les échanges entre les acteurs de la recherche et les professionnels de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement, et de faciliter leur appropriation par les acteurs de la chaîne de valeur agri-alimentaire (professionnels du secteur, chercheurs, conseillers, R&D, agriculteurs, enseignants et apprenants, décideurs publics, société civile, etc.). Elle complète la démarche générale de transfert des Carrefours de l'Innovation INRAE (<https://ciag.hub.inrae.fr/>) qui réunissent ces acteurs impliqués dans les travaux au cœur des défis mondiaux et sociétaux de notre siècle : production et performance économique, santé, changement climatique, raréfaction des ressources non renouvelables, préservation de la biodiversité, des ressources naturelles et de l'environnement, qualité de vie et des emplois...

La revue est une propriété d'INRAE, intégralement financée sur des fonds publics.

Revue en accès libre diamant, publiée par INRAE. Les articles sont relus et validés par des experts scientifiques et opérationnels.



Site de la revue : <https://ciag.hub.inrae.fr/revue-innovations-agronomiques>

Contact : innovations-agronomiques@inrae.fr

Adresse : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement – 147 rue de l'Université – 75338 Paris Cedex 07

ISSN : 1958-5853 (édition électronique)

ISBN (PDF) : 978-2-7380-3029-0

ISBN (ePub) : 978-2-7380-3030-6

DOI : <https://doi.org/10.17180/innovagro-2026-vol113>

Pour citer ce numéro : Collectif. Innovations agronomiques. Élevages durables respectueux de la santé et du bien-être des animaux, 2026, 113. [10.17180/innovagro-2026-vol113](https://doi.org/10.17180/innovagro-2026-vol113)

Photos de couverture : PEXELS

Licence : CC BY 4.0



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE

Sommaire

Claire ROGEL-GAILLARD & Xavier FERNANDEZ, 2026 - Pour des élevages durables qui s'appuient sur le bien-être animal au bénéfice de la santé, de la production et de la société. *Innovations Agronomiques* 113, 1-3

<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol113-art01>

Bien-être et santé des animaux : une synergie gagnante

Fany BLANC, Fanny CALENGE, Marie ITURBIDE & Marie-Hélène PINARD VAN DER LAAN, 2026 - Variabilité immunitaire chez les volailles : interactions entre génétique, microbiote et environnement pour améliorer la santé des élevages.

Innovations Agronomiques 113, 4-18

<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol113-art02>

Annabelle MEYNADIER, Céline DOMANGE, Morgane COSTES-THIRE, Valérie BERTHELOT, Virginie MAILLARD, Sébastien ELIS, Gaëlle MAXIN, Marie-Hélène PERRUCHOT, Richard BON, Marie-Madeleine RICHARD, Stéphanie FONTAGNE-DICHARRY, Anne COLLIN, Laurence A. GUILLOTEAU, Sophie LEMOSQUET, Sébastien DEJEAN, Denys DURAND & Florence GONDRET, 2026 - SOSAgro : un consortium dédié au pilotage des élevages adoptant les principes agroécologiques et visant à minimiser le stress oxydant.



Innovations Agronomiques 113, 19-27
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol113-art03>

Préserver la relation adulte-jeune en élevage

Léna JOANNÈS & Lionel REISDORFFER, 2026 - Le référentiel Happy Farmer : un outil intégré d'évaluation du bien-être en élevage bovin.
 Innovations Agronomiques 113, 28-36
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol113-art04>

Co-conception de systèmes d'élevage conjuguant santé et bien-être

Florence HELLEC, Laurent BRUNET, Amandine DURPOIX, Nadège AIGUEPERSE, Xavier BOIVIN & Thomas PUECH, 2026 - L'élevage des veaux femelles par des vaches nourrices en production laitière. Synthèse de 10 années d'expérimentation à l'unité INRAE-ASTER.
 Innovations Agronomiques 113, 37-51
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol113-art05>

Clémence BIÈCHE-TERRIER, Elsa DELANOUE, Anne-Charlotte DOCKES, Christine ROGUET, Luc MIRABITO, Jean-Pierre BIDANEL, Joanna LITT & René BAUMONT, 2026 - Regards croisés des sciences biologiques, agronomiques et humaines sur la perception de l'animal d'élevage (résultats préliminaires).
 Innovations Agronomiques 113, 52-63
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol113-art06>

Morgane LEROUX & Romain PIOVAN, 2026 - Impliquer les citoyens dans les processus d'innovation en élevage.
 Innovations Agronomiques 113, 64-76
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol113-art07>

Christian DUCROT, Geneviève AUBIN-HOUZELSTEIN, Agathe GIGNOUX, Dorine SEVERE, Romain PIOVAN, Maria Belén BARRIO, Antoine DORE, Hélène BOMBART, Guillaume TIXIER, Sandrine PETIT & Xavier FERNANDEZ, 2026 - Entre normes, labellisation et politiques publiques : les enjeux juridiques, éthiques et moraux du bien-être animal et de la santé des animaux.
 Innovations Agronomiques 113, 77-88
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol113-art08>

Jennifer CHAMBEAUD, Lise PINAQUI & Morgane LEROUX, 2026 - Concevoir des parcours de poulets de chair innovants conciliant bien-être animal et biosécurité renforcée.
 Innovations Agronomiques 113, 89-103
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol113-art09>

Stérénn TOMOZYK & Morgane LEROUX, 2026 - Co-construction d'une méthode d'évaluation des coûts et bénéfices, monétaires et non monétaires, des pratiques favorables au bien-être animal à l'échelle de l'exploitation.
 Innovations Agronomiques 113, 104-124
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol113-art10>



Pour des élevages durables qui s'appuient sur le bien-être animal au bénéfice de la santé, de la production et de la société.

Claire ROGEL-GAILLARD^{1*}, Xavier FERNANDEZ^{2*}

¹ Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, GABI, 78350, Jouy-en-Josas, France

² INRAE, Département Phase, 37380 Nouzilly, France

* Claire Rogel-Gaillard est directrice scientifique adjointe agriculture d'INRAE ; Xavier Fernandez est chef du département physiologie animale et systèmes d'élevages d'INRAE.

Correspondance : claire.rogel-gaillard@inrae.fr ; xavier.fernandez@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol113-art01>

Résumé

Concevoir des élevages favorisant la santé et le bien-être des animaux est un pari gagnant pour les éleveurs et une réponse aux attentes des citoyens. Dans ce numéro sont abordés les synergies et tensions entre bien-être et santé, les impacts des pratiques favorisant les relations sociales entre animaux, la reconception des systèmes d'élevage associant les parties prenantes, ainsi que les conditions de leur déploiement par les filières sur le terrain.

Mots clefs : élevage, éleveurs, bien-être animal, multi-performance, durabilité, transition

Abstract: For sustainable livestock farming based on animal welfare, for the benefit of health, production and society.

Designing livestock farming systems that promote animal health and welfare is a win-win for farmers and meets societal expectations. This issue explores the synergies and tensions between welfare and health, the impacts of practices that promote social interactions between animals, the codesign of livestock farming systems involving stakeholders, and the conditions for their implementation.

Keywords: livestock farming, farmers, animal welfare, multi-performance, sustainability, transition

Les défis auxquels est confronté le secteur de l'élevage aujourd'hui sont multiples et s'inscrivent dans un contexte marqué par l'intensification des enjeux liés au changement climatique, par des attentes sociétales croissantes en matière de bien-être animal, ainsi que par les incertitudes entourant le renouvellement des générations d'éleveurs. La durabilité des systèmes d'élevage nécessite de concilier rentabilité économique, productivité, restauration et préservation de l'environnement, santé et bien-être des animaux. Cette multi-performance s'appuie sur une prise en compte accrue du bien-être des animaux, levier majeur pour la santé et la production, à associer au bien-être au travail des éleveurs, dans une perspective « un seul bien-être ».

Sans exhaustivité, ce volume de la revue Innovations agronomiques vient compléter les apports du carrefour de novembre 2025 sur le sujet. Les contributions réunies dans ce numéro abordent notamment les synergies et tensions entre santé et bien-être des animaux, les effets de certaines pratiques d'élevage sur ces deux dimensions, les démarches participatives mobilisant chercheurs, éleveurs et acteurs des filières, ainsi que les conditions de valorisation de ces pratiques. Ces contributions mettent en lumière les questionnements et approches scientifiques et organisationnelles pour relever les défis auxquels l'élevage est confronté : le rôle de la recherche pour améliorer les connaissances sur le bien-être des animaux, le rôle central des parties prenantes (chercheurs, éleveurs, citoyens, acteurs socio-économiques) pour coconstruire des solutions actionnables sur le



terrain, et l'importance du cadre normatif et de la gouvernance publique pour accompagner les évolutions de l'élevage.

Il existe une montée en puissance de normes et d'outils d'évaluation autour du bien-être des animaux, intégrés aux trajectoires de transition agroécologique. Ces exigences se heurtent à la nécessité de faire évoluer les systèmes d'élevage face à des environnements plus fluctuants que par le passé, conditionnés par la température et les aléas climatiques, la pression en pathogènes, les ressources alimentaires, etc. Dans ce contexte, le changement climatique agit comme un révélateur des capacités d'adaptation des animaux et des systèmes d'élevage. Les notions de robustesse, de résilience et de capacité à faire face à des environnements plus variables, telles qu'abordées dans ce numéro, deviennent des critères majeurs de conception et d'évaluation des systèmes d'élevage. L'amélioration génétique des animaux ayant porté de longue date sur des objectifs à vocation essentiellement productive dans des environnements bien maîtrisés, certaines lignées sélectionnées sont insuffisamment adaptées aux conditions d'élevage plus variables associées au développement des pratiques agroécologiques, ou à celles imposées par les nouvelles réglementations sur le bien-être des animaux. Comme exemples : l'accès aux parcours extérieurs considérés comme favorables au bien-être mais sources de risques sanitaires accrus, l'hypersensibilité de certaines volailles à l'intensité lumineuse. Les articles rappellent que l'adaptation des animaux aux milieux reconfigurés pour améliorer la résilience et la durabilité des élevages et mieux répondre aux attentes sociétales est un sujet à considérer comme prioritaire. Elever des animaux mal adaptés à leur environnement serait en contradiction avec les objectifs de durabilité.

L'équilibre entre santé, bien-être, adaptation au milieu, charge de travail des éleveurs et contraintes économiques soulève des tensions avec des arbitrages à opérer. Les avancées sur le sujet mettent en évidence le besoin de réfléchir les compromis par une approche systémique et multifactorielle fondée sur les connaissances de plus en plus fines sur les animaux. Le bien-être est désormais envisagé au-delà de la simple bientraitance, utilisable aussi comme un marqueur prédictif de santé. Il inclut l'expression des émotions positives, la diversité des comportements individuels et sociaux au sein des groupes, avec des particularités par espèce, qui requièrent de prendre en compte la biologie et l'éthologie propres à chaque espèce. Cette approche repose sur des outils de mesure et de suivi des animaux, avec l'identification de seuils d'alerte. Les exemples de robots de traite capables de détecter des anomalies - par conductivité du lait pour prédiction de mammites avant leur expression clinique - illustrent la capacité de la technologie à alerter précocement. Au-delà de faciliter la surveillance, ces dispositifs ouvrent la voie à une compréhension plus intégrée des états de santé et de bien-être. L'analyse combinée des observations comportementales, des données physiologiques et des informations environnementales, facilitée par les outils de d'intelligence artificielle, permet d'envisager l'émergence d'indicateurs prédictifs capables de mieux anticiper les situations à risque et d'accompagner des stratégies de prévention plus personnalisées.

Le bien-être des animaux est lié à celui de leurs éleveurs et par extension a vocation à s'étendre à celui des citoyens-consommateurs. La fierté du travail réalisé dans un élevage au bénéfice d'animaux en bonne santé, dont le bien-être est garanti, nourrit un cercle vertueux qui renforce l'acceptabilité sociétale de l'élevage. La compatibilité entre grandes structures, transition agroécologique et exigences accrues en matière de bien-être nécessite des trajectoires pensées et construites collectivement, afin de préserver une diversité de modèles d'élevage tout en garantissant des standards élevés de qualité de vie des animaux et des éleveurs. Cela suppose de concevoir des agroéquipements et des bâtiments qui réduisent la pénibilité du travail des éleveurs et intègrent des exigences en matière de bien-être, afin de contribuer aussi à améliorer directement la santé et le bien-être des animaux. Ces évolutions ne pourront pas se déployer durablement sans mécanismes de reconnaissance économique et sans partage de la valeur au sein des filières. L'accompagnement des transitions suppose ainsi des dispositifs de gouvernance associant producteurs, organisations professionnelles, acteurs économiques, pouvoirs publics et consommateurs autour d'objectifs partagés.



En conclusion, il est attendu de placer le bien-être des animaux et ses conséquences positives sur la santé au cœur de la durabilité des élevages dans ses trois piliers : l'économie, la société, l'environnement. Santé et bien-être sont des variables interdépendantes nécessaires à la multi-performance, dont la vitalité économique des exploitations et la qualité de vie au travail des éleveurs. Cette dynamique exige des flux constants d'informations, observations et expérimentations entre chercheurs et professionnels. Les travaux scientifiques produisent des cadres théoriques, des outils et des données avec une vision de long terme. Les éleveurs apportent la réalité du terrain, un savoir expérientiel, une connaissance des contraintes, des innovations empiriques. Les éleveurs connaissent leurs animaux et sont les mieux placés pour repérer et identifier les signaux faibles de santé et de bien-être : formaliser et objectiver cet « œil de l'éleveur » offre des perspectives à explorer largement pour enrichir et consolider les données et grilles d'analyses. La synergie entre sciences et pratiques a besoin de fonctionner en réciprocité pour construire les solutions opérationnelles, avec aussi les consommateurs et les acteurs socio-économiques qui ont leurs rôles à jouer dans la transition agroécologique des systèmes d'élevage.

Bonne lecture de ce numéro dédié au bien-être en appui à la santé : un allié des animaux et des éleveurs pour la durabilité des systèmes d'élevage.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs ont utilisé des technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction, en bénéficiant de la retranscription de la table ronde finale de la journée.

ORCID des auteurs

Claire Rogel-Gaillard : <https://orcid.org/0000-0002-2174-1962>

Xavier Fernandez : <https://orcid.org/0000-0002-1841-1647>

Contributions des auteurs

Claire Rogel-Gaillard et Xavier Fernandez ont écrit cet article.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Déclaration de soutien financier

Sans objet.

Pour citer cet article : Claire ROGEL-GAILLARD & Xavier FERNANDEZ, 2026 - Pour des élevages durables qui s'appuient sur le bien-être animal au bénéfice de la santé, de la production et de la société. *Innovations Agronomiques* 113, 1-3 <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol113-art01>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



Variabilité immunitaire chez les volailles : interactions entre génétique, microbiote et environnement pour améliorer la santé des élevages

Fany BLANC, Fanny CALENGE, Marie ITURBIDE, Marie-Hélène PINARD-VAN DER LAAN

Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, GABI, 78350 Jouy-en-Josas, France

Correspondance : fany.blanc@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol113-art02>

Résumé

La transition des systèmes avicoles, marquée par la réduction des traitements antimicrobiens et le développement d'élevages alternatifs, souligne l'importance de la variabilité interindividuelle des réponses immunitaires dans un contexte de diversification des risques sanitaires. Les phénotypes immunitaires dépendent de la génétique de l'hôte, du microbiote intestinal et de l'environnement d'élevage. Cette synthèse aborde ces interactions à travers le concept d'holobionte. Les notions de résistance, tolérance, résilience et robustesse sanitaire sont discutées, ainsi que des indicateurs individuels et collectifs de santé. Enfin, les perspectives d'intégration de données immunitaires, microbiologiques et comportementales dans les stratégies de sélection et de gestion sanitaire sont abordées.

Mots-clés : Immunité aviaire ; Holobionte ; Microbiote intestinal ; Génétique ; Environnement d'élevage ; Immunocompétence ; Épidémiogénétique

Abstract: Immune variability in poultry: from identifying determinants to improving flock health

The transition in poultry production systems, characterized by reduced antimicrobial use and the development of alternative farming systems, underscores the importance of interindividual variability in immune responses amid diversified health risks. Immune phenotypes depend on host genetics, the intestinal microbiota, and the rearing environment. This review addresses these interactions through the holobiont concept. The notions of resistance, tolerance, resilience, and health robustness are discussed, together with individual and collective health indicators. Finally, perspectives for integrating immunological, microbiological, and behavioral data into breeding and health management strategies are presented.

Keywords: Avian immunity; Holobiont; Gut microbiota; Genetics; Rearing environment; Immunocompetence; Epidemiogenetics

1. Introduction : la variabilité immunitaire au cœur des transitions avicoles

Les filières avicoles, historiquement dominées par des systèmes intensifs standardisés, évoluent aujourd'hui sous l'effet conjoint de la réduction de l'usage des intrants médicamenteux, du développement de systèmes alternatifs et des attentes sociétales croissantes en matière de bien-être animal. Ces évolutions modifient les conditions d'exposition sanitaire des animaux et la gestion des risques infectieux au sein des élevages. Dans les systèmes plein air en particulier, les conditions d'exposition aux agents infectieux se diversifient, qu'il s'agisse d'expositions extrinsèques liées à l'accès à l'extérieur et aux contacts avec la faune sauvage, ou d'expositions intrinsèques associées aux possibilités plus limitées d'assainissement du milieu de vie. Les variations climatiques contribuent également à l'hétérogénéité des défis sanitaires en modulant la capacité des animaux à répondre aux infections. Au-delà de la santé des élevages, ces enjeux s'inscrivent dans une perspective plus large de santé publique, dans le cadre du concept *One Health*. Les volailles constituent en effet un réservoir



potentiel pour certains agents zoonotiques (virus influenza aviaires, salmonelles, par exemple) et peuvent jouer un rôle dans l'émergence ou la transmission de pathogènes à potentiel pandémique. La variabilité immunitaire interindividuelle constitue un déterminant majeur des dynamiques sanitaires au sein des élevages, en influençant directement la circulation des agents infectieux et la stabilité sanitaire à l'échelle du groupe.

Lorsque le recours aux traitements antimicrobiens est limité, la santé d'un lot dépend davantage de la capacité intrinsèque des animaux à contrôler les infections. Or, la réponse vaccinale et la sensibilité aux agents pathogènes varient fortement entre individus, lignées et environnements. Par ailleurs, plusieurs décennies de sélection orientée vers les performances de production ont pu entraîner une détérioration de la robustesse immunitaire (cf. Définitions).

Nos travaux s'inscrivent dans une démarche visant à mieux connaître cette variabilité comme le produit d'interactions entre génome, microbiote et environnement d'élevage. Cette approche considère l'animal comme un holobionte (cf. Définitions), entité associant l'hôte et ses communautés microbiennes, dont les interactions structurent la physiologie, les comportements et la santé.

Cette synthèse ne prétend pas couvrir l'ensemble des dimensions de l'immunité aviaire, mais se concentre sur les axes de recherche que nous développons chez les poules pondeuses et les poulets de chair : l'étude des déterminants génétiques, microbiens et environnementaux de la réponse immunitaire et de leurs impacts sur la santé animale à l'échelle individuelle et populationnelle. En mettant en lumière la diversité des déterminants de l'immunité, ce travail propose un cadre conceptuel visant à accompagner le développement de systèmes d'élevage plus résilients face aux défis sanitaires et durables. Les principales interactions abordées dans cette synthèse sont résumées dans la Figure 1.

2. Les déterminants de l'immunité

2.1. Le génome de l'hôte : un déterminant structurant

Le système immunitaire est en partie sous contrôle génétique, ce qui explique une part importante de la variabilité des réponses infectieuses et vaccinales chez les vertébrés comme chez les volailles. Les comparaisons entre races et entre lignées menées dans des environnements contrôlés mettent en évidence des différences d'origine génétique concernant la composition cellulaire sanguine, la quantité d'anticorps naturels ou acquis, ainsi que l'intensité et la cinétique des réponses aux infections expérimentales ou à la vaccination (Bilková *et al.*, 2017 ; Kramer *et al.*, 2003 ; Sun *et al.*, 2011 ; Lecoœur *et al.*, 2024).

Les dispositifs expérimentaux de sélection divergente ont apporté des démonstrations directes du contrôle génétique de la réponse immunitaire et des réponses aux épreuves antigéniques (Pinard-van der Laan *et al.*, 2020). Des lignées de poules pondeuses ont été sélectionnées expérimentalement pour une réponse humorale plus forte à la vaccination contre le virus de la maladie de Newcastle, ou pour une réponse immunitaire à médiation cellulaire renforcée, classiquement évaluée par une réaction d'hypersensibilité à la phytohémagglutinine (Pinard-van der Laan, 2002). Les lignées sélectionnées sur la réponse humorale présentent des titres d'anticorps post-vaccinaux plus grands et plus persistants vis-à-vis du vaccin contre la maladie de Newcastle, ainsi que des réponses accrues à d'autres antigènes (Zerjal *et al.*, 2021). Ces modifications s'accompagnent de variations de paramètres physiologiques et de performance qui leur sont corrélées, notamment une diminution du poids corporel chez les lignées à forte réponse anticorps, suggérant un compromis (trade-off) entre fonctions (Zerjal *et al.*, 2021). Au-delà de la réponse vaccinale, plusieurs études ont montré que ces différences d'origine génétique des paramètres immunitaires se traduisent par des variations de résistance à des infections bactériennes ou virales lors d'épreuves expérimentales, confirmant ainsi que l'architecture immunitaire



conditionne la résistance aux infections (Dan Heller *et al.*, 1992 ; Berghof *et al.*, 2019 ; Al-Murrani *et al.*, 2002 ; Wang *et al.*, 2023).

À l'échelle des populations, les valeurs estimées de l'héritabilité des paramètres immunitaires, des réponses vaccinales et des phénotypes de résistance aux infections — tels que les titres d'anticorps mesurés après infection naturelle ou après épreuve infectieuse expérimentale — sont généralement modérées mais significatives (Cheng *et al.*, 1991 ; Psifidi *et al.*, 2016 ; van der Klein *et al.*, 2015 ; Berghof *et al.*, 2018). Par exemple, des valeurs de l'héritabilité comprises entre 0,2 et 0,4 ont été estimées pour des réponses vaccinales, indiquant qu'une proportion modérée de la variance phénotypique observée est attribuable aux effets génétiques additifs (Racanati *et al.*, 2025). Ces caractères présentent un déterminisme polygénique et une forte sensibilité aux interactions génotype-environnement. Dans ce contexte, la sélection génomique apparaît comme une approche prédictive particulièrement prometteuse pour intégrer la robustesse immunitaire dans les schémas de sélection. En combinant un phénotypage de paramètres immunitaires dans une population de référence et un génotypage à haute densité, il est possible de prédire la valeur génétique des animaux pour la réponse vaccinale et la résistance aux infections. Des études d'association ont identifié des QTL et des gènes impliqués dans la variation des réponses anticorps, de la quantité des cellules sanguines ou de la réactivité immunitaire (Biscarini *et al.*, 2010 ; Zhang *et al.*, 2015 ; Berghof *et al.*, 2018). Ces résultats confirment la possibilité d'intégrer la robustesse immunitaire dans les schémas de sélection. L'enjeu n'est cependant pas uniquement d'identifier des loci, mais de définir des phénotypes prédictifs, standardisables et compatibles avec une sélection multi-caractères.

2.2. Microbiote intestinal : un modulateur essentiel

En plus du contrôle génétique, le microbiote intestinal constitue un déterminant majeur de la santé et de l'immunité de l'hôte. Il s'agit d'une communauté microbienne complexe et dynamique impliquée dans de nombreux processus physiologiques essentiels, notamment la digestion, le métabolisme énergétique et la régulation du système immunitaire. Dès les premiers stades de la vie, les interactions entre le microbiote intestinal et l'hôte contribuent à la maturation du système immunitaire, à l'éducation des réponses immunitaires innée et adaptative, ainsi qu'à l'établissement d'un équilibre entre réponse et tolérance à ces micro-organismes (Schokker *et al.*, 2015 ; Calenge *et al.*, 2014). Le microbiote participe également à l'effet barrière contre les agents pathogènes par des mécanismes de compétition écologique, de production de métabolites antimicrobiens et de modulation de l'environnement intestinal. Des états de dysbiose, correspondants à des déséquilibres du microbiote, sont associés à une augmentation du risque de maladies infectieuses ou inflammatoires, tandis que certaines configurations microbiennes sont corrélées à une meilleure robustesse sanitaire (cf. Définitions) (Bulin *et al.*, 2024).

Chez la poule, de nombreuses études ont mis en évidence des associations entre la composition du microbiote intestinal et divers indicateurs de santé, tels que la prédisposition et/ou la sensibilité aux infections (Cazals *et al.*, 2022), l'intensité de la réponse inflammatoire ou l'efficacité de la réponse vaccinale (Borey *et al.*, 2022). Par exemple, nous avons démontré que la composition du microbiote cæcal diffère significativement entre poulets selon le portage, élevé ou faible, de *Salmonella enterica* Enteritidis, avec des taxons bactériens appartenant notamment aux Christensenellaceae, Enterobacteriaceae et Ruminococcaceae surreprésentés dans certains profils (Cazals *et al.*, 2022). Ces observations sont cohérentes avec des travaux montrant que la composition du microbiote avant l'infection par *Salmonella* peut influencer les phénotypes de faible ou forte excrétion bactérienne (Kempf *et al.*, 2020).

En raison de son influence sur la santé, le microbiote intestinal constitue une cible privilégiée d'interventions nutritionnelles, avec le développement d'additifs tels que les probiotiques, prébiotiques, synbiotiques ou postbiotiques. Ces produits sont supposés apporter des bénéfices sur la santé en modulant la composition du microbiote. Ainsi, de nombreux travaux, synthétisés notamment dans la



revue de Zhang *et al.* (2025), montrent que les *probiotiques* augmentent l'abondance de bactéries bénéfiques, améliorent la diversité microbienne du tractus gastro-intestinal et augmentent la production de métabolites tels que les acides gras à chaîne courte, ce qui contribue à l'homéostasie intestinale et à la santé de l'hôte. Cependant, bien que ces produits soient largement utilisés, et que plusieurs études rapportent des effets bénéfiques sur les performances zootechniques, l'équilibre du microbiote ou certains paramètres immunitaires, leur efficacité reste variable selon les conditions d'élevage, les souches utilisées et le contexte sanitaire. Les mécanismes précis par lesquels ils modulent l'immunité et la santé demeurent par ailleurs imparfaitement compris, soulignant la nécessité de travaux de recherche approfondis. Nous avons montré récemment chez des poulets de chair qu'un probiotique à base de lactobacilles réduit l'expression de certaines molécules impliquées dans les voies inflammatoires intestinales si les conditions alimentaires sont riches en polysaccharides non amidonnés, en parallèle de modifications de la composition microbienne cœcale (Jansseune *et al.*, 2026). En conditions d'infection expérimentale par *Salmonella* ou *Eimeria* (agent de la coccidiose), différents travaux montrent que l'apport de probiotiques peut atténuer la dysbiose intestinale et réduire le portage (Khan *et al.*, 2020 ; Cai *et al.*, 2023).

Bien que le microbiote intestinal apparaisse impliqué dans la variabilité des réponses sanitaires, sa contribution exacte reste difficile à quantifier et sa modulation durable en élevage demeure complexe. L'utilisation du microbiote comme variable explicative ou levier d'intervention nécessitera donc de valider la robustesse et la stabilité des signatures identifiées en conditions de terrain.

2.3. Environnement d'élevage : modulateur de l'immunité

L'environnement d'élevage conditionne l'exposition aux micro-organismes, éventuellement pathogènes, ainsi que les conditions physiques, thermiques et comportementales auxquelles les animaux sont confrontés, influençant ainsi la maturation et la régulation du système immunitaire. Les systèmes avec accès à l'extérieur, dits plein air, modifient les conditions de vie des animaux en favorisant l'expression de certains comportements naturels. Ils répondent également aux fortes attentes sociétales en matière de bien-être animal (Widmar *et al.*, 2020 ; Morales *et al.*, 2021). Ces systèmes modifient également les conditions d'exposition des animaux aux agents microbiens et parasitaires, le mode d'élevage constituant un déterminant majeur de la composition du microbiote et de l'exposition environnementale aux agents infectieux (Kers *et al.*, 2018 ; Permin *et al.*, 1999).

Cette exposition différenciée peut moduler la maturation du système immunitaire et la dynamique des réponses adaptatives. Des différences de cinétique et d'intensité des réponses anticorps post-vaccinales ont par exemple été observées entre des poules élevées dans des bâtiments fermés et celles ayant accès à un parcours extérieur. Ces différences sont également influencées par le fond génétique en interaction avec le microbiote (Lecoeur *et al.*, 2023).

Un élément clé des systèmes plein air réside dans la forte variabilité individuelle d'usage du parcours. Certaines poules explorent régulièrement l'extérieur, tandis que d'autres restent majoritairement en bâtiment, ce qui génère des expositions et des niveaux d'activité différents. L'usage du parcours a été associé à des variations du ratio hétérophiles/lymphocytes et d'autres indicateurs de stress, ainsi qu'à des différences de la condition corporelle et de la masse relative de certains organes lymphoïdes, suggérant des modulations de l'allocation des ressources physiologiques (Larsen *et al.*, 2018 ; Kolakshyapati *et al.*, 2019 ; Bari *et al.*, 2020).

L'activité locomotrice, la thermorégulation et la gestion du stress mobilisent des ressources physiologiques pouvant agir sur la fonction immunitaire. Ainsi, au-delà de la simple exposition microbienne, l'environnement d'élevage influence l'immunité via des mécanismes d'allocation de ressources et d'interactions avec le fond génétique et le microbiote. L'environnement d'élevage doit dès lors être envisagé comme un déterminant important de l'immunité.



2.4. Génétique, microbiote, environnement : des interactions à prendre en compte

Les déterminants génétiques, microbiens et environnementaux ne constituent pas des facteurs indépendants, mais un système d'interactions dynamiques structurant le phénotype immunitaire. Par exemple, la variabilité génétique de l'hôte influe sur la composition du microbiote intestinal. Aussi, des héritabilités ont été rapportées pour certains taxons microbiens ou indices de diversité, y compris pour des communautés impliquées dans des fonctions immunitaires (Goodrich *et al.*, 2014 ; Déru *et al.*, 2022 ; Marie-Etancelin *et al.*, 2026). Chez la poule, ces effets génétiques ont été mis en évidence par la comparaison de lignées génétiques (Borey *et al.*, 2022 ; Cazals *et al.*, 2022 ; Lecoeur *et al.*, 2024) et par l'identification de régions génomiques associées à l'abondance de certains taxons bactériens. Il est ainsi concevable que le fond génétique de l'hôte influence indirectement l'immunité et la santé via la modulation du microbiote intestinal. Ainsi nous avons montré que des lignées expérimentales (lignées de poules pondeuses Leghorn Blanche N et 6) avaient à la fois des niveaux de portage de salmonelles différents et des microbiotes de compositions très différentes ; nos travaux confortent l'hypothèse que la génétique module le niveau de portage en partie via une action sur le microbiote caecal (Cazals *et al.*, 2022a, 2022b). L'environnement module également le microbiote intestinal : ce dernier est très sensible à l'environnement microbien immédiat de l'élevage, l'eau de boisson, l'alimentation, la densité d'élevage, l'hygiène ou encore le stress thermique (Kers *et al.*, 2018).

Ces interactions étroites entre génétique, microbiote et santé, reliées à l'environnement d'élevage, peuvent être appréhendées dans le cadre conceptuel de l'holobionte (Margulis, 1991 ; Rosenberg et Zilber-Rosenberg, 2018). L'holobionte désigne l'unité biologique constituée par l'hôte et l'ensemble de ses microbiotes, le phénotype résultant de l'interaction entre le génome de l'hôte, les génomes microbiens et l'environnement. Le génome de l'hôte influence l'établissement et la stabilité des communautés microbiennes via des mécanismes physiologiques et immunitaires, tandis que le microbiote module en retour l'expression des caractères de santé et d'immunité. L'environnement, en particulier l'alimentation et les conditions d'élevage, agit comme un facteur supplémentaire important de ces interactions (Pérez-Enciso *et al.*, 2021).

Dans une perspective appliquée, l'holobionte peut être envisagé comme une unité intégrative susceptible d'améliorer la précision de prédiction de phénotypes immunitaires et sanitaires. Les approches hologénomiques intègrent conjointement les informations génétiques de l'hôte et les données relatives au microbiote intestinal afin d'améliorer la prédiction des caractères complexes. Ces modèles permettent d'estimer la contribution spécifique du microbiote à la variance phénotypique, désignée sous le terme de microbiabilité, en complément de l'héritabilité génétique. Plusieurs études menées chez des animaux d'élevage ont montré que l'intégration du microbiote peut améliorer la prédiction de caractères liés à la santé et à l'immunité, en particulier pour des traits faiblement héréditaires (Calle-García *et al.*, 2023 ; Brulin *et al.*, 2024).

Ainsi, considérer l'holobionte comme unité d'analyse offre une vision intégrée des déterminants de l'immunité et de la santé et améliore la prédiction des phénotypes sanitaires ainsi que l'orientation des stratégies de sélection et de prévention pour une meilleure santé.

3. Qu'est-ce qu'une réponse immunitaire adaptée ? Vers des indicateurs pertinents

3.1. Vers de nouveaux critères d'évaluation de l'immunité

L'évaluation de l'immunité chez les espèces aviaires d'élevage se heurte à une difficulté conceptuelle majeure : la définition même d'une réponse immunitaire "adaptée" reste encore incomplètement définie (Blanc, 2025). Or, cette question est centrale dès lors qu'il s'agit d'identifier des critères pertinents pour le phénotypage, la sélection ou l'évaluation de la protection. En effet, les mécanismes immunitaires associés à une protection efficace diffèrent selon les agents pathogènes et les contextes d'infection ou



de vaccination. Une réponse immunitaire de forte intensité, qu'il s'agisse de la production d'anticorps, de l'activité cytotoxique ou de la réponse inflammatoire, n'est donc pas nécessairement synonyme de protection optimale (Soutter *et al.*, 2020). L'interprétation des paramètres immunologiques doit ainsi être replacée dans le contexte des mécanismes effecteurs réellement impliqués dans la protection contre un agent donné.

À l'échelle individuelle, plusieurs propriétés peuvent être considérées pour caractériser la réponse d'un animal à une infection, et celles-ci ne convergent pas nécessairement. Un animal peut notamment être caractérisé par sa capacité à éviter l'infection (résistance à l'infection), à limiter la charge ou la réplication du pathogène, à limiter l'expression clinique de la maladie, à maintenir un niveau de production malgré l'infection (tolérance), à récupérer rapidement, ou encore à développer une immunité durable (Doeschl-Wilson *et al.*, 2021). Ces caractères ne sont ni biologiquement équivalents, ni fondés sur les mêmes mécanismes physiologiques, et ne sont pas sélectionnables de la même manière ; ils peuvent présenter des corrélations génétiques variables, voire antagonistes. Une forte résistance peut, par exemple, s'accompagner de coûts énergétiques affectant les performances de production, tandis que la tolérance repose sur des mécanismes partiellement distincts.

Sur le plan méthodologique, ces phénotypes ne sont pas accessibles dans les mêmes conditions : certains paramètres peuvent être mesurés en contexte standardisé, tandis que d'autres nécessitent une exposition naturelle ou une épreuve infectieuse, voire des modèles intégrant effets génétiques directs et indirects.

Ainsi, la définition d'une réponse immunitaire « optimale » ne se limite pas à la capacité de contrôler l'infection ou à réduire les signes cliniques. Elle dépend également du contexte épidémiologique, des conséquences sur les performances zootechniques, de la transmission des agents infectieux et, plus largement, des objectifs poursuivis à l'échelle du système d'élevage. Il convient donc d'adopter une perspective dynamique et de raisonner en termes de résilience sanitaire (cf. Définitions), c'est-à-dire d'évolution de la robustesse sanitaire au cours du temps. L'identification de trajectoires de réponse nécessite des mesures répétées dans le temps et l'intégration de données de natures parfois très différentes (immunologiques, comportementales, zootechniques, métaboliques). Des approches de classification peuvent distinguer différents types de trajectoires de réponse face à un stress (Ithurbide *et al.*, 2023).

La validation de ces trajectoires requiert des indicateurs capables de refléter l'effet cumulé d'une résilience à long terme (Friggens *et al.*, 2022). Chez les animaux à carrière productive longue, comme les poules pondeuses, la longévité fonctionnelle, définie comme la durée de vie corrigée pour le niveau productif (Sasaki, 2013), constitue à cet égard un critère intégrateur pertinent. Elle résulte en effet de la capacité de l'individu à surmonter l'ensemble des perturbations environnementales rencontrées au cours de sa vie (Ithurbide *et al.*, 2025). Ce type de critère présente l'avantage de synthétiser, de manière rétrospective, les événements sanitaires, métaboliques et comportementaux ayant affecté l'animal et ses congénères, et invite à dépasser les paramètres immunologiques ponctuels au profit d'indicateurs intégrés de santé et de bien-être à l'échelle de la carrière de l'animal.

3.2. Identifier des indicateurs de robustesse immunitaire et sanitaire

La diversité des dimensions associées à la réponse immunitaire souligne la nécessité d'identifier des indicateurs opérationnels de l'immunocompétence (cf. Définitions). L'immunocompétence correspond à la capacité intrinsèque d'un individu à déclencher une réponse immunitaire efficace, et se distingue de la réponse effectivement observée à un moment donné.

Dans une approche indirecte visant à identifier des marqueurs prédictifs de la capacité des animaux à répondre efficacement aux infections, l'immunophénotypage à l'état basal apparaît particulièrement pertinent (Blanc, 2025). Le sang constitue à cet égard un compartiment de choix, accessible et



informatif, compatible avec des études à grande échelle. Peuvent notamment être mesurés la composition des cellules sanguines (Bílková *et al.*, 2017 ; Fair *et al.*, 2008), les concentrations d'immunoglobulines totales et d'anticorps naturels (Kramer *et al.*, 2003 ; Sun *et al.*, 2011) ou spécifiques, ou encore la composition des principales catégories de protéines et les activités enzymatiques reflétant l'état inflammatoire et la défense innée (Hamzic *et al.*, 2015 ; Oke *et al.*, 2024). Leur interprétation doit toutefois tenir compte du fait qu'un excès de réponse inflammatoire ou immunitaire peut s'accompagner d'effets délétères pour l'hôte.

En complément de ces paramètres sanguins, des tests fonctionnels *ex vivo* permettent d'évaluer la capacité de réponse des cellules immunitaires dans des conditions contrôlées, notamment des tests de phagocytose, de stimulation du sang total ou d'activation lymphocytaire (Naghizadeh *et al.*, 2019 ; Song *et al.*, 2022 ; Hao *et al.*, 2021). Enfin, des approches sans a priori fondées sur le transcriptome ou le protéome sanguin offrent une voie prometteuse pour identifier des signatures moléculaires associées à l'immunocompétence (Burgess, 2004 ; Désert *et al.*, 2016 ; Blanc *et al.*, 2021), bien que leur coût limite encore leur usage à grande échelle.

Au total, l'identification d'indicateurs d'immunocompétence suppose d'arbitrer entre pertinence biologique, valeur prédictive et faisabilité technique et opérationnelle, condition indispensable à leur intégration dans des dispositifs de sélection génétique visant l'amélioration de la robustesse et de la résistance aux maladies, et/ou de prévention et d'optimisation de la gestion sanitaire.

3.3. Critères de validation centrés sur la santé à l'échelle du groupe

Une spécificité majeure des maladies infectieuses par rapport aux stress abiotiques réside dans leur caractère transmissible. La manière dont un individu répond à une infection n'affecte pas uniquement ses propres performances, mais peut également influencer la santé du groupe : mortalité, morbidité, et homogénéité du troupeau. Un animal qui ne contracte pas la maladie, ou qui l'excrète faiblement, pourrait protéger indirectement ses congénères en réduisant la pression infectieuse au sein du lot.

L'épidémiogénétique (cf. Définitions), discipline intégrant génétique quantitative et épidémiologie, permet d'étudier comment les caractéristiques génétiques individuelles influencent la dynamique de transmission des agents pathogènes à l'échelle de la population (Doeschl-Wilson *et al.*, 2021 ; Bijma *et al.*, 2022). Cette approche ouvre la voie à l'identification de caractères jusqu'ici peu considérés en sélection, tels que l'infectiosité individuelle — c'est-à-dire la propension d'un animal infecté à transmettre le pathogène à ses congénères — ou la durée de la période d'excrétion ou de contagiosité. Le phénomène des individus super-excréteurs responsables d'une part disproportionnée de la transmission, illustre l'importance potentielle de cette hétérogénéité individuelle dans la dynamique épidémique.

À l'inverse, nous pouvons évoquer la possibilité théorique de sélectionner des animaux non ou faiblement excréteurs, caractérisés par une capacité de transmission réduite. Dans certains contextes, ces animaux seraient susceptibles de réduire la contagiosité tout en permettant une exposition subclinique contrôlée. Cette hypothèse soulève toutefois des questions éthiques, sanitaires et opérationnelles et nécessite des validations expérimentales approfondies.

Ces considérations plaident pour le développement de critères de résilience sanitaire face aux maladies infectieuses définis non pas uniquement à l'échelle de l'individu, mais aussi à l'échelle du groupe ou de l'élevage. Cette dimension populationnelle demeure encore peu explorée en production animale. Des travaux récents proposent d'étendre le concept de « trajectoire de résilience » à l'échelle du troupeau, en analysant conjointement l'évolution des performances zootechniques moyennes (par exemple la croissance) et la charge infectieuse environnementale au cours du temps (Ithurbide *et al.*, 2026). Lors d'un épisode infectieux, l'augmentation de la charge infectieuse s'accompagne généralement d'une déviation des performances par rapport à la trajectoire attendue, suivie d'une phase de récupération.



La relation dynamique entre ces deux variables peut être représentée sous forme d'une boucle dont l'aire reflète à la fois l'intensité de la perturbation et la vitesse de retour à l'état initial : une boucle de faible amplitude traduit ainsi une meilleure résilience collective du troupeau.

D'autres pistes émergent, telles que le taux de morbidité à l'échelle du troupeau, la vitesse de récupération du lot, le maintien de l'homogénéité zootechnique... Dans ce contexte, l'amélioration de la résilience sanitaire des populations avicoles pourrait contribuer non seulement à la durabilité des systèmes de production, mais également à la maîtrise des risques sanitaires à l'interface animal-homme-environnement. Ces dimensions restent toutefois peu intégrées aux critères de sélection actuels. L'intégration d'effets génétiques indirects et de critères collectifs constitue un verrou méthodologique majeur : les dispositifs expérimentaux, les données longitudinales et les modèles statistiques nécessaires à leur mise en œuvre en aviculture restent largement à développer.

4. Perspectives d'application et conditions de transfert vers l'élevage

Les progrès récents dans la compréhension des déterminants génétiques, microbiens et environnementaux de l'immunité ouvrent des perspectives concrètes pour renforcer la robustesse sanitaire des élevages avicoles. Les orientations présentées ci-dessous illustrent des leviers étayés par des travaux expérimentaux, sans prétendre à l'exhaustivité. Leur mise en œuvre nécessite toutefois des validations complémentaires et une évaluation en conditions réelles d'élevage.

À court terme, certains leviers relevant de la gestion de l'environnement d'élevage et des pratiques sanitaires apparaissent prometteurs, bien que leur efficacité doive encore être consolidée selon les contextes de production. Dans des systèmes où le recours aux antimicrobiens serait moindre, la maîtrise des conditions d'élevage, la limitation des stress et l'adaptation des pratiques de biosécurité contribuent à préserver un équilibre physiologique compatible avec une réponse immunitaire efficace. Ces interventions s'inscrivent dans une approche de gestion plus intégrée de la santé, articulant conduite d'élevage et biosécurité, stratégies nutritionnelles visant à moduler le microbiote et, à plus long terme, sélection génétique. Leur articulation optimale dépend des caractéristiques propres à chaque système de production.

La modulation du microbiote intestinal constitue un facteur clé, compte tenu de son rôle reconnu dans la maturation et la régulation du système immunitaire. Des stratégies nutritionnelles incluant l'usage de pré-, pro- ou postbiotiques, ainsi que la limitation des perturbations antibiotiques précoces, ont montré des effets immunomodulateurs. Cependant, si l'influence du microbiote sur l'immunité est établie, les signatures associées à une immunocompétence optimale demeurent insuffisamment caractérisées pour permettre des recommandations ciblées.

Le développement d'outils de suivi automatisé du comportement, de la croissance ou de la consommation permet d'identifier précocement des altérations sanitaires. Leur articulation avec des indicateurs immunitaires ou microbiens, ainsi que la standardisation de panels d'immunophénotypage à l'état basal réellement prédictifs, constituent toutefois des chantiers encore en cours.

À moyen terme, la sélection génétique intégrant des critères de robustesse immunitaire constitue une perspective intéressante. Les héritabilités modérées mais significatives de nombreux paramètres immunitaires, ainsi que l'identification de régions génomiques impliquées dans la variabilité des réponses immunitaires, indiquent qu'une amélioration génétique est théoriquement possible. La sélection génomique multi-caractères, combinant performances de production et critères sanitaires ou comportementaux pertinents — incluant notamment des indicateurs de robustesse immunitaire — constitue une voie stratégique. Sa mise en œuvre dépendra toutefois de la définition de critères fiables, qu'ils soient immunitaires, sanitaires ou comportementaux, de la validation de leur pouvoir prédictif en conditions de terrain et de leur viabilité économique.



Ces constats soulignent l'importance d'un dialogue étroit entre recherche et filière pour accompagner l'évolution des systèmes d'élevage. Le développement de dispositifs de collecte de données en conditions de production, reliant immunité, microbiote, comportement et performances zootechniques, et paramètres environnementaux constitue une étape clé pour confronter les résultats issus de contextes expérimentaux à la variabilité des conditions d'élevage. L'intégration progressive de critères de robustesse sanitaire et de résilience des troupeaux dans les outils d'évaluation des systèmes d'élevage favoriserait une approche plus cohérente entre santé animale, bien-être et performance de production.

5. Conclusion

Les différentes transitions en cours en aviculture rendent indispensable une prise en compte explicite de la variabilité immunitaire afin de limiter la sensibilité aux infections et de stabiliser les performances dans des environnements où l'exposition est plus grande. Les connaissances actuelles montrent que la robustesse sanitaire ne repose pas sur un déterminant unique, mais sur un réseau d'interactions entre génétique, microbiote et environnement, que le cadre holobionte permet d'appréhender de manière intégrative. Dans cette perspective, l'identification et la validation d'indicateurs prédictifs de l'immunocompétence, leur articulation avec des trajectoires de réponse telles que résistance, tolérance ou résilience, ainsi que la modélisation intégrée des déterminants génétiques, microbiens et environnementaux à l'échelle du troupeau constituent des priorités scientifiques majeures. L'intégration de critères collectifs et d'approches épidémiogénétiques ouvre la voie à des stratégies combinant sélection génétique et gestion sanitaire, visant à la fois l'amélioration individuelle, la réduction de la transmission et le renforcement de la résilience des troupeaux. Au-delà de l'échelle de l'élevage, ces avancées s'inscrivent dans une perspective *One Health* en contribuant à limiter la circulation des agents pathogènes, à réduire le recours aux antimicrobiens et à renforcer la stabilité sanitaire des systèmes. Leur traduction en indicateurs, fiables et économiquement viables, conditionnera la capacité effective de la filière à renforcer durablement la résilience sanitaire des élevages avicoles, tandis que d'autres leviers, notamment liés à l'ingénierie des systèmes ou à la gestion territoriale des risques infectieux, dépassent le cadre de cette synthèse.

Définitions

Holobionte : Entité biologique intégrée constituée d'un organisme hôte et de l'ensemble de ses communautés microbiennes associées (microbiote). Chez la poule, l'holobionte comprend l'animal et ses micro-organismes intestinaux, cutanés et respiratoires, dont les interactions façonnent la physiologie, le comportement et l'immunité. Cette vision dépasse la conception de l'individu comme organisme isolé pour envisager un « super-organisme » dont les propriétés émergent des interactions entre l'hôte, le microbiote et l'environnement.

Immunocompétence : Aptitude intrinsèque d'un individu à développer des réponses immunitaires adaptées face à des défis infectieux ou vaccinaux. Elle correspond à un potentiel latent, génétiquement et physiologiquement déterminé, qui ne s'exprime pleinement qu'en cas d'activation du système immunitaire.

Indicateur d'immunocompétence : Marqueur biologique (aux échelles cellulaire, moléculaire, transcriptomique) corrélé permettant d'estimer ce potentiel immunitaire. Ces paramètres constituent des indicateurs indirects, mesurables en pratique, visant à prédire la capacité future du système immunitaire à répondre efficacement sans recourir à une épreuve infectieuse.

Robustesse immunitaire : Capacité fonctionnelle du système immunitaire d'un individu à contrôler efficacement une infection ou à répondre de manière adaptée à une vaccination, tout en limitant les coûts physiologiques associés. Elle renvoie à des mécanismes biologiques individuels (réponses cellulaires, humorales dont anticorps, régulation inflammatoire) et constitue un déterminant de la santé, sans en représenter à elle seule l'expression globale.



Robustesse sanitaire : Expression intégrée de la capacité d'un individu ou d'un groupe à maintenir un bon état de santé et des performances zootechniques en présence de contraintes infectieuses ou environnementales. Elle inclut la robustesse immunitaire mais également des dimensions comportementales, métaboliques, environnementales et épidémiologiques. À l'échelle du troupeau, elle intègre les dynamiques de transmission et les effets collectifs. L'immunocompétence constitue un déterminant potentiel de la robustesse immunitaire, laquelle, à son tour, contribue à la robustesse sanitaire, sans que ces notions soient strictement équivalentes.

Épidémiogénétique : Discipline intégrant la génétique quantitative et l'épidémiologie pour étudier comment les caractéristiques génétiques des individus influencent non seulement leur propre sensibilité aux infections, mais aussi la dynamique de transmission des agents pathogènes au sein d'une population. Elle permet d'identifier des déterminants génétiques de l'infectiosité et de la propagation des maladies à l'échelle du troupeau.

Résilience sanitaire : Capacité dynamique d'un individu ou d'un groupe à absorber une perturbation sanitaire (infectieuse ou environnementale), à limiter ses conséquences sur la santé et les performances, puis à retrouver un état fonctionnel stable. Elle s'apprécie dans le temps, à travers la trajectoire de réponse à la perturbation, et intègre des dimensions immunitaires, métaboliques, comportementales et épidémiologiques.

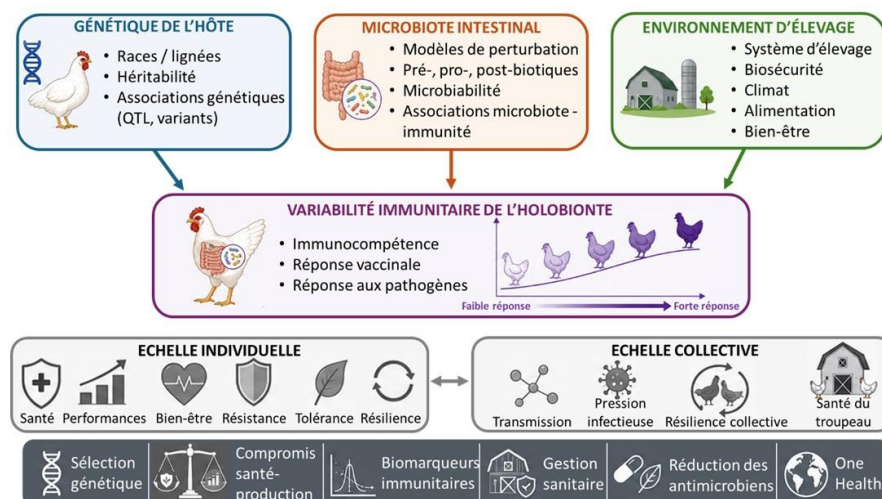


Figure 1 : Interactions entre génétique, microbiote et environnement dans la santé des élevages avicoles

Description de la figure 1

Figure de synthèse illustrant les interactions entre la génétique de l'hôte, le microbiote intestinal et l'environnement d'élevage dans la construction de la variabilité immunitaire et de la santé des élevages avicoles.

La figure est organisée en quatre niveaux. Dans la partie supérieure, trois blocs représentent les principaux déterminants biologiques et environnementaux : (i) la génétique de l'hôte, incluant races ou lignées, héritabilité et associations génétiques ; (ii) le microbiote intestinal, comprenant modèles de perturbation, pré-, pro- et postbiotiques, microbiabilité et associations microbiote-immunité ; et (iii) l'environnement d'élevage, incluant système d'élevage, biosécurité, climat, alimentation et bien-être.

Ces trois composantes convergent vers un bloc central représentant la variabilité immunitaire de l'holobionte. Un poulet y symbolise l'holobionte, défini comme l'association entre l'hôte et ses microbiotes. Ce bloc inclut plusieurs dimensions de la réponse immunitaire : immunocompétence, réponse vaccinale et réponse aux pathogènes. Un gradient de couleur allant du blanc au violet foncé illustre une augmentation de l'intensité des réponses immunitaires entre individus.

Dans la partie inférieure, la figure distingue deux niveaux de conséquences sanitaires : (i) une échelle individuelle, comprenant santé, performances, bien-être, résistance, tolérance et résilience ; (ii) une échelle collective, correspondant à la santé du troupeau, incluant transmission, pression infectieuse, résilience collective et santé du troupeau.

Enfin, un bandeau inférieur présente plusieurs applications potentielles : sélection génétique, compromis santé-production, biomarqueurs immunitaires, gestion sanitaire, réduction des antimicrobiens et approche *One Health*.



Éthique

Ce travail constitue une synthèse bibliographique et n'a impliqué aucune expérimentation animale ni collecte de données originales. Aucune approbation éthique n'était donc requise.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Cette synthèse ne repose pas sur des données originales ni sur des modèles développés spécifiquement pour ce travail. Aucun jeu de données ou code n'est donc associé à cet article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les autrices déclarent avoir utilisé l'outil ChatGPT pour la reformulation ainsi que comme assistance à la conception de certains éléments graphiques. Les contenus textuels et graphiques ont été intégralement vérifiés, corrigés, enrichis et validés par les autrices.

ORCIDs des auteurs

Fany BLANC : <https://orcid.org/0000-0003-2366-9826>

Fanny CALENGE : <https://orcid.org/0000-0003-3529-3387>

Marie ITHURBIDE : <https://orcid.org/0000-0002-5987-3194>

Marie-Hélène PINARD VAN DER LAAN : <https://orcid.org/0000-0003-4992-8726>

Contributions des auteurs

Toutes les autrices ont contribué à la conception de la synthèse, à la réflexion scientifique sous-jacente et à la rédaction du manuscrit. Toutes ont relu et approuvé la version finale.

Déclaration d'intérêt

Les autrices déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les autrices remercient tous les membres de l'équipe GeMS de l'unité GABI pour les travaux menés dans ces champs thématiques, qui ont contribué aux réflexions présentées dans cette synthèse. Les autrices remercient également le métaprogramme SANBA et le métaprogramme HOLOFLUX d'INRAE, le département de Génétique Animale d'INRAE, l'Institut Carnot France Futur Élevage ainsi que le partenariat européen Animal Health and Welfare pour le soutien apporté aux travaux de recherche ayant contribué à cette synthèse.

Références bibliographiques

Al-Murrani, W. K., Al-Rawi, I. K., & Raof, N. M. (2002). Genetic resistance to *Salmonella typhimurium* in two lines of chickens selected as resistant and sensitive on the basis of heterophil/lymphocyte ratio. *British Poultry Science*, 43(4), 501–507. <https://doi.org/10.1080/0007166022000004408>

Bari, M. S., Laurenson, Y. C. S. M., Cohen-Barnhouse, A. M., Walkden-Brown, S. W., & Campbell, D. L. M. (2020). Effects of outdoor ranging on external and internal health parameters for hens from different rearing enrichments. *PeerJ*, 8, e8720. <https://doi.org/10.7717/peerj.8720>

Berghof, T. V. L., Matthijs, M. G. R., Arts, J. A. J., Bovenhuis, H., Dwars, R. M., van der Poel, J. J., Visker, M. H. P. W., & Parmentier, H. K. (2019). Selective breeding for high natural antibody level increases resistance to avian pathogenic