

Face au changement climatique, quelles stratégies d'atténuation et d'adaptation pour les productions avicoles ?

Anne COLLIN¹, Vincent COUSTHAM², Jacob Kokou TONA³, Sophie TESSERAUD¹, Sandrine MIGNON-GRASTEAU¹, Bertrand MÉDA¹, Anaïs VITORINO CARVALHO⁴, Yann GUYOT⁵, Sandrine LAGARRIGUE⁶, Frédérique PITEL⁷, Tatiana ZERJAL⁸

¹INRAE, Université de Tours, BOA, 37380, Nouzilly, France

²INRAE, Université de Pau & Pays de l'Adour, NuMeA, E2S UPPA, Aquapôle, 64310, Saint-Pée-sur-Nivelle, France

³Centre d'Excellence Régional sur les Sciences Aviaires (CERSA), Université de Lomé, B.P. 1515, Lomé, Togo

⁴CNRS, IFCE, INRAE, Université de Tours, PRC, 37380, Nouzilly, France

⁵ITAVI, 37380, Nouzilly, France

⁶PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590, Saint-Gilles, France

⁷INRAE, INPT, ENVT, Université de Toulouse, GenPhySE, 31326, Castanet-Tolosan, France

⁸INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, GABI, 78350, Jouy-en-Josas, France

Courriel : Anne.Collin@inrae.fr

■ **Le changement climatique est un enjeu majeur pour les productions animales. Les filières avicoles, comme les autres filières, doivent évoluer pour d'une part, réduire leur impact environnemental et, d'autre part s'adapter aux nouvelles conditions climatiques. Il s'agit de coadapter les animaux et le milieu d'élevage, de réorganiser les filières géographiquement et entre maillons des chaînes de production pour faire face aux menaces sanitaires tout en économisant les ressources, et en limitant la production de gaz à effet de serre¹.**

Introduction

L'élevage est essentiel à la sécurité alimentaire mondiale, comme le soulignent l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2017) et Leroy *et al.* (2022). La viande, le lait et les œufs fournissent 34 % des protéines consommées à travers le monde. Ils contribuent notamment à couvrir les besoins humains en micronutriments essentiels tels que les vitamines B (notamment cobalamine B12 et riboflavine B2) et le fer, le zinc et le calcium. Parmi les produits animaux, la viande de volaille et les œufs sont – avec la viande porcine – les principales sources de

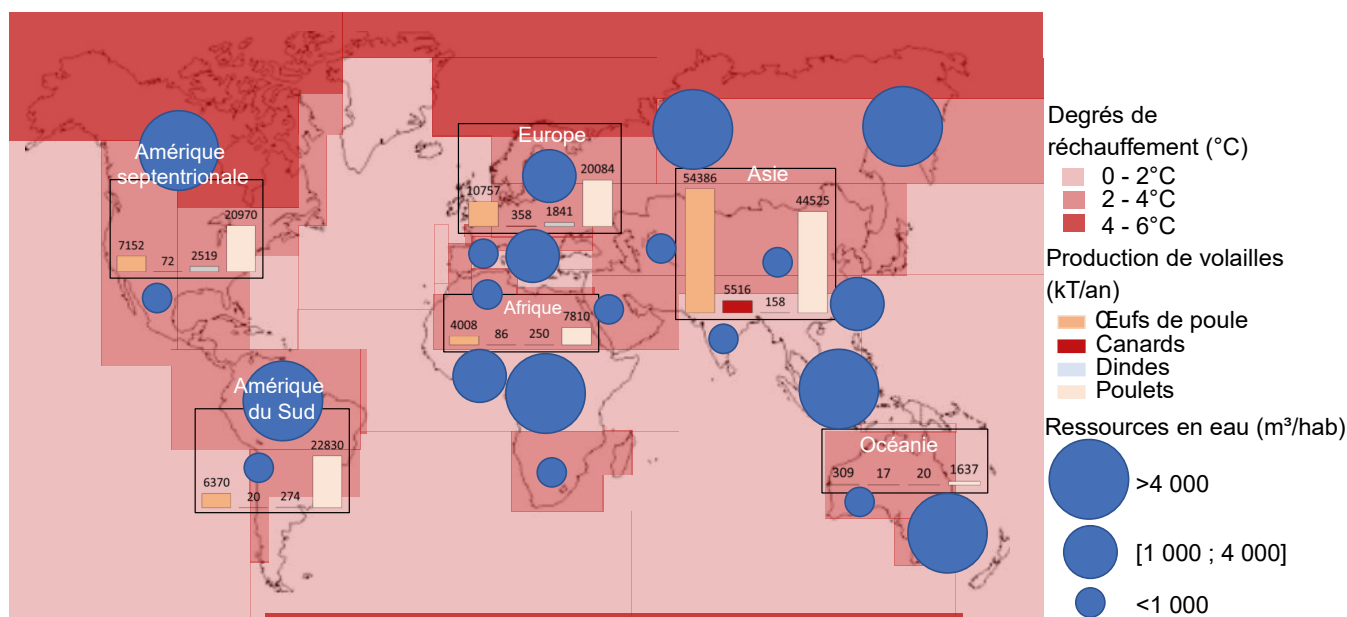
protéines animales pour l'alimentation humaine dans le monde. À partir des données prospectives de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et de la FAO, il est prévu que la production de volailles, soumise à aucun interdit alimentaire religieux, continue de progresser, dans les pays en développement (la viande de volaille représentant 40 % de l'augmentation de la production de viande prévue entre 2017-2019 et 2029), et dans une moindre mesure dans les pays développés (+ 15 % ; OECD/FAO, 2020). Cette augmentation restera le principal moteur de la croissance de la production de viande, mais dans une mesure relativement moindre qu'au cours de

la dernière décennie. La **figure 1** dresse un état des lieux de la production avicole en 2022 en Europe, Afrique, Amérique du Sud, Amérique du Nord, Asie et Océanie. Des cycles de production courts permettent aux chaînes de production d'approvisionner le marché dans un délai restreint, grâce à des avancées spectaculaires et continues en matière de génétique, de santé animale et de pratiques d'alimentation.

Les filières avicoles, comme les autres secteurs de l'élevage, sont à la fois contributrices au changement climatique et en même temps vulnérables au réchauffement de la planète et à ses conséquences directes et indirectes.

1 Cet article a pour origine une synthèse réalisée dans le cadre du World's Poultry Congress (Collin *et al.*, 2022).

Figure 1. Projection des températures moyennes pour un réchauffement global de 2 °C (IPCC, 2022), production actuelle de volailles (FAOSTAT, 2024) et projection des ressources en eau en 2025 (Le Centre d'information sur l'eau, 2022).



Parmi les conséquences directes, on peut citer une augmentation des températures environnementales incluant une augmentation des températures moyennes globales et des vagues de chaleur plus fréquentes (Masson-Delmotte & Zhai, 2022, voir sur la [figure 1](#) la répartition des températures au niveau mondial pour un scénario à + 2 °C), accompagnée d'une variabilité accrue de l'environnement thermique avec des périodes chaudes voire sèches prolongées, un risque accru de précipitations erratiques (voir sur la [figure 1](#) la projection des ressources en eau en 2025, montrant des ressources limitées notamment en Europe, Afrique du Nord, Amérique centrale, Asie Centrale), la fonte des glaces et les risques d'inondation, le réchauffement et l'acidification des océans.

De plus, les températures moyennes plus élevées favorisent les ectoparasites dans des zones d'où ils étaient absents et certains parasites et pathogènes peuvent passer d'une espèce à l'autre (Sparagano & Ho, 2020). En outre, même si la génétique a permis d'améliorer l'efficacité alimentaire des animaux et si l'utilisation du fumier comme fertilisant a permis d'améliorer l'efficacité des systèmes de production, l'aviculture contribue à la production de gaz à effet de serre (CO₂, N₂O et CH₄, principalement en raison de la gestion

des effluents et du chauffage ; Dunkley & Dunkley, 2013), à l'utilisation d'eau et à la diminution de la biodiversité (Méda *et al.*, 2021). Ainsi, la production des aliments pour animaux, l'utilisation d'énergie et, dans une moindre mesure pour les volailles, les rejets des animaux et la production de gaz à effet de serre contribuent au changement climatique. L'impact carbone des productions avicoles calculé par analyse de cycle de vie (ACV) est présenté dans le [tableau 1](#), montrant par exemple une gradation de l'impact carbone calculé par kg de poids vif produit, entre des productions de poulet de chair de type conventionnel, de type label rouge et de type biologique et la production de dinde, mais avec des disparités entre les valeurs calculées entre pays ou zones géographiques d'élevage. En revanche, pour la production d'œufs de poule, les impacts carbone des systèmes conventionnels (cage ou sol), plein air et biologiques semblent varier davantage en fonction de l'origine des données que des types de systèmes ([tableau 1](#)). De plus, comme rapporté par De Vries & De Boer (2010), l'impact carbone de la viande de poulet (3,7-6,9 kg éqCO₂/kg viande) est nettement plus faible que celui de la viande de bœuf (14-32 kg éqCO₂/kg viande), et dans une moindre mesure que celui de la viande de porc (3,9-10 kg éqCO₂/kg viande), tandis que l'impact carbone des œufs est

supérieur (3,9-4,9 kg éqCO₂/kg œuf) à celui du lait (0,84-1,3 kg éqCO₂/kg lait). Cependant, les différences de teneurs en protéines rendent parfois difficile la comparaison entre produits animaux. Ainsi, lorsque les impacts sont rapportés au kg de protéines, les ordres de grandeurs sont comparables pour le lait, les œufs et les viandes de poulet et de porc (21-53 kg éqCO₂/kg protéines) mais la viande de bœuf affiche toujours des impacts supérieurs (75-170 kg éqCO₂/kg protéines ; De Vries & De Boer, 2010).

Un défi majeur de l'aviculture dans les régions tropicales, notamment en Asie et Amérique du Sud, fortes productrices de volailles, et en Afrique subsaharienne où ces productions émergent, est la persistance de températures ambiantes élevées qui provoquent un stress thermique susceptible d'être aggravé par une humidité relative élevée. L'augmentation de la température a également une influence négative sur le comportement, les réponses physiologiques ([encadré 1](#)) et immunologiques des poulets de chair et des poules pondeuses, entraînant une diminution des capacités immunitaires, des problèmes endocriniens et un déséquilibre électrolytique, qui nuisent au bien-être, à la santé, aux performances voire à la reproduction des volailles (Quinteiro-Filho *et al.*, 2012).

Tableau 1. Impact carbone des différentes productions avicoles calculées par analyses de cycle de vie (ACV).

Publication	Espèce	Mode de production	Pays	Impact carbone	Unité (kg éqCO ₂ par)
Arroyo <i>et al.</i> (2013a, 2013b)	Oie	Système avec parcours pour la phase avant gavage conventionnel	FR	37,50 ¹	kg de foie gras
				31,13 ²	
				4,09 ³	kg de poids vif
				3,66 ⁴	
Farrant <i>et al.</i> (2018)	Canard	IGP <i>Canard à foie gras du Sud-Ouest</i> ⁵	FR	13,69	kg de foie gras
				2,14	kg de poids vif
Leinonen <i>et al.</i> (2016)	Dinde	Conventionnel ⁶	GB	4,30	
Williams <i>et al.</i> (2016)		Conventionnel	GB	4,51	
Kheiralipour <i>et al.</i> (2017)			IR	3,63	
Ramedani <i>et al.</i> (2019)	Autruche	Conventionnel	IR	4,20	
Ramedani <i>et al.</i> (2019)	Poulet		IR	4,35	
González-García <i>et al.</i> (2014)		Conventionnel ⁷	PT	1,89	
Thévenot <i>et al.</i> (2013)		Conventionnel	FR – Île Réunion	1,56	
			AU – QLD ⁸	2,02	
Wiedemann <i>et al.</i> (2017)		Conventionnel	AU – SA ⁹	1,67	
			Plein air « <i>free-range</i> »	AU – QLD + SA ¹⁰	
		Conventionnel	BR – CW ¹¹	2,06	
BR- SO ¹²			1,45		
			FR – Bretagne ¹³	2,22	
Da Silva <i>et al.</i> (2014)		Plein air « Label Rouge »	FR – Aquitaine ¹⁴	2,70	
	FR – Centre Val de Loire ¹⁵		2,49		
			2,71		
Méda <i>et al.</i> (2023a)	Conventionnel	FR – Grand Ouest	1,90 ¹⁶		
			1,85 ¹⁷		
			1,65 ¹⁸		
Pelletier (2008)		US	1,40 ¹⁹		
Méda <i>et al.</i> (2017)		FR – Grand Ouest	2,13 ²⁰		
			2,02 ²¹		
			1,92 ²²		

¹ Alimentation avec maïs² Alimentation sans maïs remplacé par du sorgho³ Alimentation avec maïs – en sortie phase gavage/abattage ; recalculée avec données articles/phase abattage négligée dans le recalcul car < 1 %⁴ Alimentation sans maïs remplacé par du sorgho ; en sortie phase gavage/abattage ; recalculée avec données articles/phase abattage négligée dans le recalcul car < 1 %⁵ Alimentation avec soja en démarrage, et avec maïs en gavage⁶ Moyenne des impacts des 2 sexes × 2 types de ventilation (dynamique vs statique)⁷ Recalcul en considérant un rendement carcasse de 70 %⁸ QLD = Queensland state ; recalculé pour un rendement carcasse de 70 % et 15 % de l'impact sortie « abattoir » pour l'abattage⁹ SA = South Australia state ; recalculé pour un rendement carcasse de 70 % et 15 % de l'impact sortie « abattoir » pour l'abattage¹⁰ ACV réalisées sur données provenant des deux états – peu de soja importé ; recalculé pour un rendement carcasse de 70 % et 15 % de l'impact sortie « abattoir » pour l'abattage¹¹ CW = Center-West, large-scale system¹² SO = South, small-scale system, pas de déforestation pour le soja¹³ Production dans le Grand-Ouest (Bretagne)¹⁴ Production dans le Sud-Ouest (Aquitaine)¹⁵ Poulet blanc de l'Orléanais (souche G657N)¹⁶ Stratégie alimentaire « classique » (18,8 % protéines en finition)¹⁷ Réduction de la teneur en protéines de l'aliment finition (– 23 g/kg)¹⁸ Réduction de la teneur en protéines de l'aliment finition (– 23 g/kg) + retrait total du soja dans cet aliment¹⁹ Impact très faible car pas de soja d'Amérique du Sud (0 déforestation)²⁰ Stratégie alimentaire « classique » (19 % protéines en finition)²¹ Réduction de la teneur en protéines de l'aliment finition (– 20 g/kg)²² Réduction de la teneur en protéines de l'aliment finition (– 40 g/kg)

Tableau 1. Impact carbone des différentes productions avicoles calculées par analyses de cycle de vie (ACV) (suite).

Publication	Espèce	Mode de production	Pays	Impact carbone	Unité (kg éqCO ₂ par)
Méda <i>et al.</i> (2021)	Poulet	Conventionnel	FR – Grand Ouest	1,95 ²³	kg de poids vif
				1,78 ²⁴	
				1,93 ²⁵	
				1,82 ²⁶	
Seguin <i>et al.</i> (2013)		Biologique	FR – Aquitaine	2,20	
			FR – Pays de Loire	2,40	
Leinonen <i>et al.</i> (2012a)		Conventionnel	GB ²⁷	3,09	
		Plein air « <i>free-range</i> »		3,59	
		Biologique		3,96	
López-Andrés <i>et al.</i> (2018)		Conventionnel ²⁷	MX	1,95	
Seguin <i>et al.</i> (2013)	Pondeuse	Biologique	FR – Bretagne	2,00	kg d'œufs
			FR – Rhône-Alpes	1,80	
Leinonen <i>et al.</i> (2012b)		Conventionnel – cages	GB	2,92	
		Conventionnel – sol		3,45	
		Plein air « <i>free-range</i> »		3,38	
		Biologique		3,42	
Abín <i>et al.</i> (2018)		Conventionnel – cages	ES	3,4	
Dekker <i>et al.</i> (2011)		Conventionnel – cages	NL	2,24	
		Conventionnel – sol ²⁸		2,68	
		Plein air « <i>free-range</i> » ²⁸		2,75	
	Biologique ²⁸	2,54			
Costantini <i>et al.</i> (2020)	Biologique	IT	1,56		
Ghasempour & Ahmadi (2016)	Conventionnel	IR – Alborz ²⁹	4,07		
Pelletier <i>et al.</i> (2014)		US	2,08		
Pelletier (2017)	Conventionnel – cages	Canada	2,44		
	Conventionnel – cages enrichies		2,31		
	Conventionnel – sol		2,40		
	Plein air « <i>free-range</i> »		2,40		
	Biologique		1,37		
Taylor <i>et al.</i> (2014)	Plein air « <i>free-range</i> »	GB (Pays de Galles)	1,60		

²³ Stratégie alimentaire « classique » – formulation à moindre coût

²⁴ Stratégie alimentaire « classique » – formulation multiobjectif (€ et environnement)

²⁵ Stratégie alimentaire « concentrée » – formulation à moindre coût

²⁶ Stratégie alimentaire « concentrée » – formulation multiobjectif (€ et environnement)

²⁷ Recalcul en considérant un rendement carcasse de 70 %

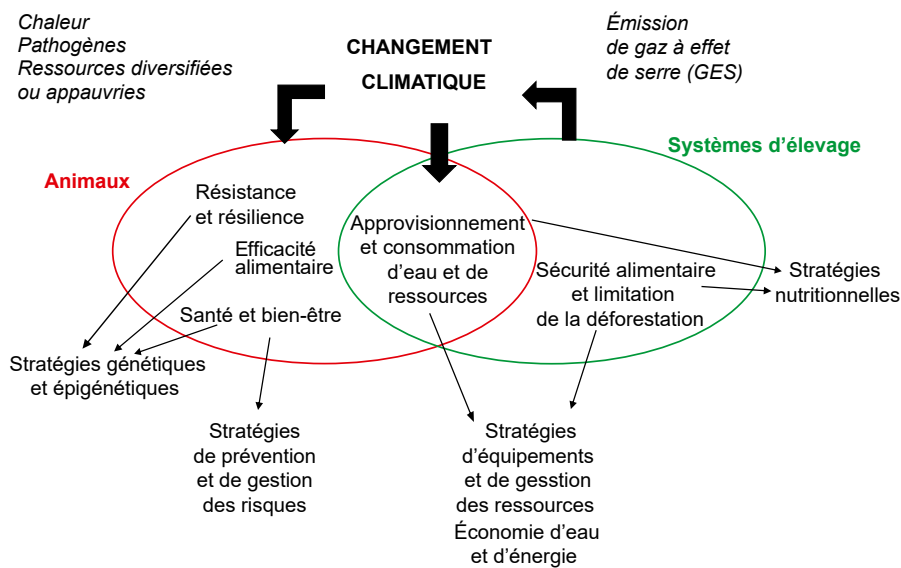
²⁸ Moyenne bâtiment « single » et « multi »-tiered

²⁹ Zone semi-montagneuse (1 300 m)

Encadré 1. Mécanismes principaux de la thermorégulation des volailles.

Les oiseaux sont des endothermes qui sont capables de réguler leur température interne (Ti) en produisant de la chaleur efficacement dès la fin de leur première semaine de vie post-éclosion. La zone de thermoneutralité thermique (TN) est une zone de températures définie par les températures critiques inférieures et supérieures, dans laquelle la dépense énergétique de l'animal pour réguler sa température interne est théoriquement constante et minimale (Renaudeau *et al.*, 2012). Les températures critiques diminuent et la zone de TN s'élargit avec l'âge de l'animal. Les mécanismes sur lesquels repose le maintien de la Ti des animaux dans des limites viables sont les pertes de chaleur ou thermolyse par voie sensible (conduction, convection, rayonnement infra-rouge) et par voie latente (évaporation d'eau, généralement au niveau de la peau par transpiration et de l'appareil respiratoire).

Lorsque la température ambiante (Ta) augmente, le différentiel de la Ta avec la Ti diminue ce qui limite les pertes par voie sensible, mais les volailles modifient leur comportement (étalement sur le sol ailes écartées, éloignement des congénères, consommation d'eau...) pour tout de même perdre de la chaleur par cette voie. Les volailles étant dépourvues de glandes sudoripares fonctionnelles, elles utilisent surtout l'hyperventilation respiratoire pour évacuer la chaleur par voie latente, ce qui modifie leurs échanges gazeux et équilibre électrolytique. Il a été également démontré que la résistance thermique, c'est-à-dire le pouvoir isolant des plumes des poulets est beaucoup plus faible lorsqu'elles sont humides que lorsqu'elles sont sèches (Webb & King, 1984). Les volailles réduisent également leur production de chaleur en diminuant leur consommation d'aliment et en limitant l'intensité de leur métabolisme par des régulations neuroendocrines, dont l'inhibition de la production de Triiodothyronine T3 par l'axe thyroïdien (Loyau *et al.*, 2015).

Figure 2. Stratégies d'adaptation des filières animales au changement climatique.

En vert sont indiqués les paramètres à moduler grâce à des stratégies liées aux systèmes d'élevage et en rouge ceux relatifs aux stratégies portant sur les animaux élevés.

L'exposition à la chaleur, selon Ibtisham *et al.* (2017), a de plus un impact néfaste sur la qualité des céréales cultivées, qui est à la base de l'alimentation des volailles, affectant donc négativement la productivité des poulets de chair et des pondeuses en zones tropicales ou tempérées soumises à des vagues de chaleur estivales et ainsi la sécurité alimentaire. Pour faire face aux conséquences du changement climatique, il est donc nécessaire de mettre en place, et si possible, de combiner des stratégies d'adaptation de l'animal, de l'exploitation, des territoires et même des filières de production, et de mettre en œuvre des stratégies d'atténuation pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre (figure 2).

1. Élever des animaux dotés de meilleures capacités d'adaptation à la chaleur

Le stress thermique, c'est-à-dire la réponse physiologique de l'animal soumis à des températures requérant une adaptation pour maintenir son homéostasie, est devenu une menace majeure pour la production avicole et pour la sécurité alimentaire en général avec la progression du réchauffement

climatique. Il est indéniable que l'augmentation constante de la productivité des poulets de chair et des poules pondeuses modernes a accru la sensibilité des lignées commerciales au stress thermique (Chen *et al.*, 2009), avec des effets délétères sur la santé des animaux, notamment au niveau intestinal (Santos *et al.*, 2015), et les caractéristiques de production, en termes de qualité et d'efficacité. Au niveau de l'animal, une première approche est d'améliorer la résistance à la chaleur grâce à des stratégies génétiques (sélection, valorisation de races rustiques), et une seconde est d'améliorer les capacités d'adaptation grâce à l'acclimatation précoce à la chaleur.

■ 1.1. Améliorer les capacités de thermorégulation des volailles pour une meilleure résistance à la chaleur

Des recherches sont développées pour trouver des solutions génétiques améliorant la résistance à la chaleur des volailles. De nombreuses études, tant chez les poulets de chair que chez les poules pondeuses, ont examiné les effets des gènes impliqués dans la couverture et la qualité des plumes comme le gène cou nu (*Na*, figure 3), le gène « sans plume » (*sc*) et le gène frisé (*F*, diminuant le pouvoir isolant du plumage) pour améliorer la résistance à

la chaleur en réduisant la surface couverte par les plumes ou leur structure et augmenter la surface de dissipation de la chaleur (Cahaner *et al.*, 2008 ; Zerjal *et al.*, 2013 ; figure 3). Les résultats sont unanimes et montrent que la réduction de la surface emplumée ou une réduction de la masse des plumes et une diminution de leur effet isolant augmente la dissipation thermique et, par conséquent, améliore la résistance à la chaleur. Dans une étude visant à évaluer l'utilisation de génotypes de poulets de chair ou poules pondeuses présentant le gène cou nu (*Na*) ou le gène frisé (*F*) (Gwaza & Nachi, 2015 ; Pawar *et al.*, 2016), il a été montré que le gène *Na* accélère la croissance et le rendement en viande chez les poulets de chair à croissance lente soumis à des températures élevées. L'utilisation de ce génotype a été signalée au Ghana (Adomako *et al.*, 2010 ; Asumah *et al.*, 2022), au Nigeria (Gwaza & Nachi, 2015) et il devrait à l'avenir être utilisé plus largement dans les zones chaudes. C'est déjà le cas dans certains élevages alternatifs avec des souches à croissance lente, notamment dans le sud de la France. De même, la présence du gène *F* chez des poules pondeuses élevées dans des villages au Ghana a permis d'améliorer la production et la qualité des œufs (Adomako *et al.*, 2014). Pourtant, l'application de stratégies génétiques liées au plumage à très large échelle au niveau mondial est encore limitée probablement en raison de la difficulté d'introgresser (c'est-à-dire intégrer par croisements successifs) rapidement une mutation dans les lignées commerciales sans trop affecter leur valeur génétique en termes de performances zootechniques. Il faudrait également communiquer spécifiquement sur l'intérêt des souches d'oiseaux à cou nu ou sans plumes pour limiter la réticence de certains consommateurs à utiliser les produits qui en sont issus.

En outre, l'utilisation de races locales plus résistantes telles que la race Fayoumi ou des races à double fin (viande et œufs) allouant moins d'énergie pour la croissance que des races sélectionnées sur ce critère, peut être plus adaptée aux conditions d'élevage difficiles rencontrées en Afrique que les lignées commerciales conventionnelles.

Figure 3. Poule et coq de type cou nu, ©WEBER Jean, INRAE.



Les méthodes de sélection conventionnelles visant à améliorer la tolérance à la chaleur n'ont jusqu'ici pas été largement appliquées pour l'élevage de volailles, principalement en raison de l'absence de caractères facilement mesurables corrélés à la résistance à la chaleur et de l'antagonisme génétique potentiel entre l'amélioration de la résistance à la chaleur, la croissance et les caractères de production (Bohren *et al.*, 1982). Parmi les paramètres utilisés pour évaluer l'impact physiologique du stress thermique, les températures corporelles enregistrées comme la température interne rectale (Ti) ou de surface (Ts) ont été étudiées afin de déterminer si elles pouvaient être utilisées comme critères de sélection pour l'adaptation à la chaleur chez les volailles. Dans un croisement entre des poulets de chair (sensibles à la chaleur) et des poulets Fayoumi (résistants à la chaleur), exposés à une chaleur journalière cyclique, des héritabilités de Ti très faibles (de 0,03 à 0,11), ont été obtenues, et des héritabilités non statistiquement différentes de zéro ont été obtenues pour des variations de Ti après une exposition aiguë et chronique à la chaleur (Van Goor *et al.*, 2015), ce qui laisse peu d'espoir quant à la possibilité d'utiliser la Ti comme critère sélectif. Des valeurs d'héritabilité plus élevées (0,2), ont été obtenues dans des souches commerciales exposées à des cycles de température ambiante élevée (28,4 °C) pour

la Ts, mesurée par thermographie infrarouge, ce qui suggère que la Ts pourrait être un caractère intéressant pour la sélection afin d'améliorer la résistance à la chaleur (Loyau *et al.*, 2016b).

La tolérance à la chaleur est un caractère complexe, car le stress thermique déclenche l'activation de nombreux réseaux moléculaires, tels que les voies de signalisation cellulaires, l'expression des gènes au niveau du système nerveux central et des tissus effecteurs, et la production de métabolites. Par conséquent, pour améliorer la tolérance à la chaleur, une bonne connaissance des différents mécanismes physiologiques impliqués dans la réponse de stress thermique et de leur fondement génétique est nécessaire. Pour ces derniers, une attention particulière est

maintenant consacrée à la compréhension du rôle régulateur en réponse au stress thermique, des gènes longs non codants et des petits acides ribonucléiques (ARN), car ils sont des acteurs importants du réseau de régulation de l'expression des gènes (Dou *et al.*, 2021).

Les études récentes reposant sur l'analyse de données « omiques » (encadré 2) révèlent très souvent des analyses concordantes indiquant que le stress oxydatif, les processus métaboliques, la régulation physiologique ou les réponses immunitaires sont les processus biologiques mis en jeu. L'identification des gènes qui réagissent à la chaleur pour maintenir l'homéostasie et réduire les problèmes causés par le stress oxydatif, combinée à une meilleure compréhension des éléments régulateurs du génome, devrait à terme permettre d'identifier des variants favorables qui pourraient être utilisés comme marqueurs génétiques dans les stratégies de sélection animale. Dans cette quête de variants adaptatifs, un rôle fondamental est joué par les races locales. Ces races locales naturellement adaptées aux conditions climatiques tropicales, bien que beaucoup moins productives que les lignées commerciales, conservent la mémoire génétique et peut-être épigénétique (c'est-à-dire relative à des changements transmissibles et réversibles de phénotypes sans modification de la séquence nucléotidique de l'acide désoxyribonucléique ADN) d'une pression de sélection à long terme de l'environnement dans lequel elles ont vécu. Jusqu'à présent rarement utilisées par les sélectionneurs car économiquement peu

Encadré 2. Principales analyses de données « omiques » pour mieux comprendre les mécanismes génétiques de la résistance à la chaleur des volailles.

Les progrès des outils biotechnologiques permettant de produire des données « omiques » à grande échelle que ce soit au niveau du génome ou de l'expression des gènes du génome, ouvrent des opportunités uniques pour comprendre la tolérance au stress thermique chez le poulet et ainsi ouvrir des pistes pour l'améliorer.

Trois principaux types d'études utilisant des données « omiques » peuvent être trouvés dans la littérature :

- 1) l'analyse d'association à l'échelle du génome (Wolc *et al.*, 2019 ; Zhuang *et al.*, 2019) ;
- 2) la recherche de signatures de sélection entre races adaptées et non adaptées à des environnements difficiles (Walugembe *et al.*, 2019 ; Gheyas *et al.*, 2021) ;
- 3) l'analyse de l'expression génique différentielle à l'aide de différents tissus et/ou de différentes races plus ou moins tolérantes à la chaleur (Lan *et al.*, 2016 ; Srikanth *et al.*, 2019).

attractives, elles pourraient représenter un réservoir génétique précieux pour améliorer la résistance à la chaleur chez les volailles et trouver des compromis acceptables entre caractères d'adaptation et de production.

Un grand nombre d'études d'expression de gènes ont mis en évidence le rôle potentiel des protéines de choc thermique (HSP) en tant que biomarqueurs de réponse au stress pour estimer le mécanisme utilisé pour maintenir l'intégrité cellulaire contre les dommages causés par le stress, notamment les atteintes à la structure, et donc à la fonction des protéines. Des niveaux d'expression accrus de gènes HSP dans le muscle sont décrits chez les races résistantes à la chaleur (Cedraz *et al.*, 2017), mais leur application dans les stratégies de sélection pour la tolérance à la chaleur n'est pas simple compte tenu de la grande diversité des réponses en fonction du type d'exposition à la chaleur (aiguë vs chronique), des tissus et des populations étudiés.

À ce jour, l'information moléculaire utilisée dans les schémas de sélection des animaux d'élevage correspond aux variations nucléotidiques de l'ADN analysées dans les modèles additifs (cumulant les effets de chacune de ces variations). Le modèle additif, bien qu'ayant fait ses preuves depuis plusieurs décennies, reste simpliste pour représenter la complexité de la relation génome-phénotype, si l'on veut prendre en compte la capacité des organismes à s'adapter à un environnement changeant, cette dernière n'étant pas exclusivement sous contrôle génétique. Ainsi, de plus en plus d'études soulignent le rôle important de l'épigénétique dans la régulation des gènes codant des protéines, qui confère la plasticité phénotypique requise pour réagir rapidement aux facteurs environnementaux (Kisliouk *et al.*, 2017). Il serait intéressant que les futurs modèles utilisés dans la sélection génomique (assistée par marqueurs moléculaires) puissent considérer cette complexité. Il s'agit d'un élément important puisque les entreprises de sélection distribuent leurs reproducteurs dans le monde entier, en particulier sous différents climats. L'amélioration génétique de

nouveaux caractères liés à l'adaptabilité des animaux à des environnements changeants serait d'un intérêt majeur afin de fournir des reproducteurs capables d'exprimer leurs performances optimales dans un large éventail d'environnements de production.

C'est en utilisant des informations génotypiques et environnementales que ces phénotypes pourront être mieux prédits. Il est donc nécessaire d'estimer la part de la variation phénotypique déterminée par les interactions entre facteurs génétiques et non génétiques, c'est-à-dire environnementaux.

■ 1.2. Améliorer la thermorégulation des volailles par des manipulations thermiques périnatales

L'une des variations phénotypiques induites par l'environnement qui pourrait être un levier efficace pour adapter les volailles au changement climatique est la modification de la réponse physiologique des oiseaux après l'éclosion induite par une manipulation thermique au cours de l'embryogenèse (MT).

a. Acclimatation précoce à la chaleur

La MT est une stratégie de conditionnement phénotypique précoce qui consiste en des variations cycliques de la température d'incubation des œufs (Loyau *et al.*, 2015). Les effets de la température d'incubation des œufs ont été largement étudiés chez le poulet, mais aussi chez plusieurs autres espèces aviaires d'intérêt agronomique, telles que les dindes, les canards et les cailles. Ainsi, des augmentations cycliques de la température d'incubation, imitant des conditions de fluctuation naturelle diminuent la température interne des oiseaux dès l'éclosion. Elles améliorent la tolérance thermique des poulets de chair mâles jusqu'à l'âge d'abattage. En effet, leur mortalité est réduite de 50 % pendant un coup de chaleur de 5 h à 25 °C, sans affecter significativement les taux d'éclosion (Piestun *et al.*, 2008). En Afrique de l'Ouest, l'utilisation de MT à 38,5 °C des jours 10 à 18 de l'incubation ou 39,5 °C des jours 7 à 16 de l'incubation diminuent

de 33 à 66 % les mortalités ultérieures des poulets de chair à croissance lente, qu'ils soient de génotypes cou nu ou non (Meteyake *et al.*, 2023). En raison d'interactions entre les mécanismes thermorégulateurs et d'autres fonctions, il a également été démontré que la MT modifie une gamme plus large de phénotypes. Par exemple, la MT affecte, selon les études, la croissance (pas d'effet ou baisses de 1 à 6 % en fonction des modèles ; Loyau *et al.*, 2013 ; Vitorino Carvalho *et al.*, 2020), le développement musculaire avec une augmentation des rendements en filet (de + 0,3 à + 1 % ; Collin *et al.*, 2007 ; Piestun *et al.*, 2009), la vascularisation cutanée (De Souza Morita *et al.*, 2016) ou l'immunité (Shanmugasundaram *et al.*, 2018). De plus, la MT augmente le poids du foie et l'activité des gènes de lipogenèse chez le canard et le poulet (Massimino *et al.*, 2019), ce qui se traduit par un engraissement des carcasses. Ce phénomène est à relier avec le fait que le dépôt de lipides accru permet de limiter l'extra-chaleur à dissiper par l'animal en cas d'oxydation à des fins énergétiques (lipides : 39,2 J/g vs protéines : 23,7 J/g ; Znaniecka, 1967).

La cyclicité du traitement et le niveau d'augmentation de la température sont des paramètres essentiels pour que la MT soit bénéfique (Loyau *et al.*, 2015). Par exemple, les augmentations de température au début de l'embryogenèse ou les températures d'incubation continuellement plus élevées sont généralement associées à des défauts d'éclosion (Piestun *et al.*, 2008 ; Vitorino Carvalho *et al.*, 2020), avec une éclosabilité de 32 % plus faible en cas d'exposition à 39,5 °C vs 37,8 °C des jours 7 à 16 d'embryogenèse. L'humidité relative dans l'incubateur doit par ailleurs être augmentée en conséquence pour prévenir la déshydratation pendant l'élévation de température, par exemple d'environ 10 % lors d'exposition cyclique à 39,5 °C vs 37,8 °C en milieu d'embryogenèse (Loyau *et al.*, 2015). L'âge des reproducteurs et leur génétique contribuent également à l'efficacité de la MT (Yalçin *et al.*, 2005). Par conséquent, les paramètres d'incubation doivent être affinés pour obtenir des effets favorables, ce qui peut expliquer pourquoi cette procédure

apparemment simple n'est pas encore largement utilisée dans les couvoirs de volailles sous climat tropical ou dans les zones à vagues de chaleur estivales où elles auraient leur intérêt. Les mécanismes moléculaires sous-jacents aux effets de la MT ne sont pas encore totalement compris. Cependant, des études récentes à l'échelle du génome suggèrent que la MT peut affecter la réponse des gènes musculaires et hypothalamiques lors d'une augmentation aiguë de la chaleur ambiante (Loyau *et al.*, 2016a ; Vitorino Carvalho *et al.*, 2021). Les mécanismes impliqués sont probablement de nature épigénétique, car la MT altère deux modifications post-traductionnelles des histones dans l'hypothalamus des poulets de chair mâles à croissance rapide, avec près de 800 régions différenciellement enrichies pour la marque d'histones H3K4me3 identifiées à l'âge de 35 jours entre poulets MT et témoins (David *et al.*, 2019). La régulation épigénétique du contrôle thermique est également suggérée par des études montrant que plusieurs marques épigénétiques sont impliquées dans la réponse au conditionnement thermique postnatal (trois jours après l'éclosion) lors de la mise en place du contrôle de la thermorégulation dans le cerveau (Yossifoff *et al.*, 2008, Kisliouk *et al.*, 2010).

Les mécanismes épigénétiques sont connus pour être potentiellement transgénérationnels, ce qui signifie que certains des effets de la MT pourraient être transmis au-delà de la génération d'animaux traitée (Guerrero-Bosagna *et al.*, 2018). Ceci est confirmé par des données récentes obtenues chez la caille, avec une diminution persistante du poids corporel des cailles et des œufs éclos à partir de la troisième génération non traitée (Vitorino Carvalho *et al.*, 2023). Cependant, bien que la MT améliore la survie lors d'une exposition à la chaleur aiguë quelques jours après l'éclosion chez les cailles, cet effet ne semble pas être transmis à la descendance. Cette observation pose la question de la possibilité d'une programmation transgénérationnelle pour conférer une tolérance à la chaleur et/ou au froid aux lignées terminales, une stratégie qui permettrait de combiner la MT avec d'autres pratiques telles que

l'incubation et/ou l'éclosion à la ferme des poulets de chair commerciaux, notamment explorées dans le projet européen PPILOW.

b. Acclimatation précoce au froid

Un moyen de lutter contre le changement climatique en augmentant la résilience des poulets de chair serait de favoriser également l'adaptation précoce des oiseaux au froid, en particulier au jeune âge où l'énergie utilisée pour le chauffage est la plus importante. Ainsi, la diminution de la température ambiante au démarrage de 4 °C (32 à 28 °C) a permis une diminution de la consommation de gaz de 11 % dans le bâtiment d'élevage expérimental, mais une augmentation de la consommation d'électricité de 4 % pour la ventilation dans l'étude de Nyuiadzi *et al.* (2017). Les stimulations d'embryons au froid juste avant l'éclosion ont eu des effets positifs sur les performances des poulets de chair mâles à croissance rapide, surtout dans un environnement de démarrage froid, avec une augmentation d'environ 2 % du poids à 40 jours suite à une incubation comprenant deux expositions brèves à 15 °C en fin d'embryogenèse vs 37,6 °C en continu, suivis d'une exposition postnatale des deux groupes à une température d'élevage de 3 °C plus fraîche en démarrage. Cependant, un paramètre de bien-être a été dégradé chez les poulets exposés au froid à la fois pendant l'embryogenèse et au démarrage du poussin (Nyuiadzi *et al.*, 2020). Ainsi, sur le filet, des stries blanches apparentées à une myopathie musculaire sont apparues pour 58 % des poulets mâles doublement stimulés. Par ailleurs, chez les femelles, les scores de pododermatite ont augmenté de plus de 20 %.

c. Acclimatation précoce

Cela suggère que des stratégies faisant varier les températures d'incubation pour acclimater les embryons au froid et/ou au chaud, doivent être soigneusement affinées et testées sur de multiples critères, y compris le bien-être animal, et sur des lignées génétiques diversifiées, avant d'être mises en pratique dans les couvoirs. En complément des stratégies d'acclimatation précoce au cours de l'embryogenèse

mentionnées précédemment, les manipulations thermiques des poussins semblent être une approche prometteuse pour améliorer la résistance à la chaleur des poulets de chair. Une consommation alimentaire plus élevée et une efficacité alimentaire stable sont liées à l'effet bénéfique de l'acclimatation précoce (Yahav & McMurtry, 2001a), permettant de combiner une croissance élevée et une tolérance accrue à la chaleur. À notre connaissance, l'acclimatation de l'embryon ou du poussin n'est pour l'instant appliquée qu'en conditions expérimentales, et il est nécessaire d'en diffuser les résultats jusqu'à l'âge d'abattage, notamment sur des souches à croissance lente utilisées en systèmes alternatifs en Europe ou en Afrique, pour sensibiliser couvoirs et éleveurs à cette nouvelle pratique.

2. Favoriser la thermolyse des volailles tout en limitant la consommation d'eau et d'énergie des bâtiments

Un moyen de refroidir l'air ambiant pendant les périodes de chaleur consiste à ajouter de l'eau, qui en s'évaporant va réduire la quantité de chaleur cumulée et donc abaisser la température, mais augmenter le taux d'humidité. À cette fin, des systèmes de refroidissement par évaporation tels que les systèmes de brumisation peuvent être utilisés dans les poulaillers fermés, nécessitant de l'eau et de l'énergie.

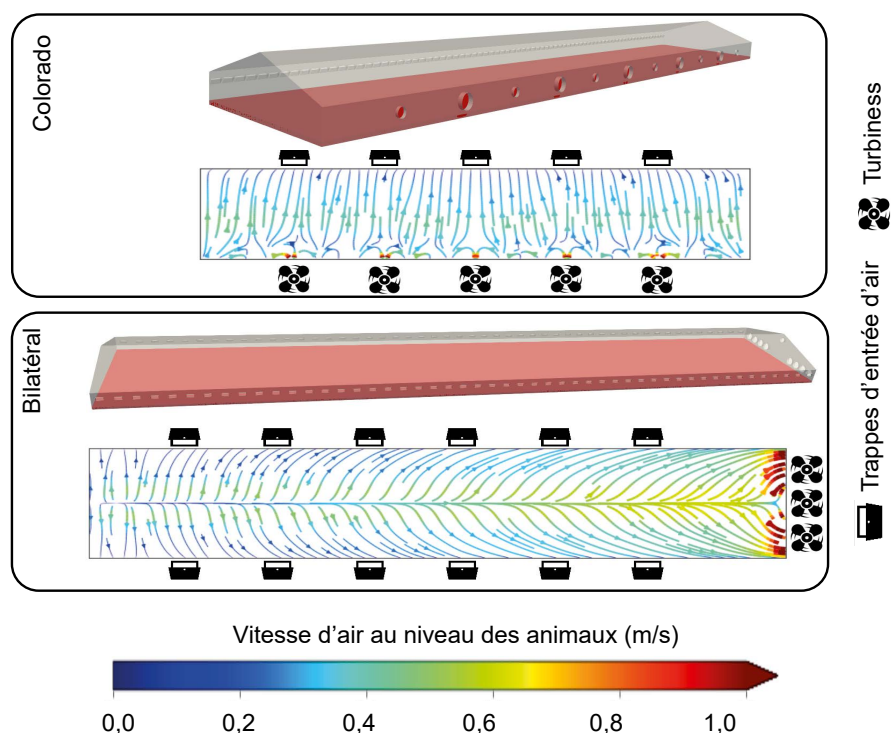
Cependant, les prévisions de la demande mondiale en eau suggèrent que la consommation d'eau devrait augmenter de 55 % d'ici 2055 (Wada *et al.*, 2016) rendant donc précieuse cette ressource. Les limites planétaires, seuils que l'humanité ne devrait pas dépasser pour garantir un espace de fonctionnement sûr pour l'humanité, pour les ressources en eau douce ont par ailleurs été dépassées (Richardson *et al.*, 2023). Un des moyens d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau pour la production des volailles passera par une meilleure gestion des cultures et des animaux, notamment *via* leur efficacité

au moyen d'approches génétiques ou de gestion (Heinke *et al.*, 2020), incluant par exemple la nutrition animale (matières premières peu exigeantes en eau, supplémentation en minéraux...). Le recyclage de l'eau en élevage et son traitement au niveau des différents ateliers de l'élevage devraient également être promus, ainsi que des pratiques épargnant l'eau pour certains acteurs des filières. Par exemple, la pratique de l'éclosion en bâtiment (Van de Ven *et al.*, 2009) pourrait permettre d'économiser l'eau utilisée actuellement pour le nettoyage des éclosiers en couvoir, tout en réduisant les impacts sanitaires pour le personnel et l'environnement de cet atelier.

Des innovations pour économiser l'eau tout en permettant aux poulets de chair de perdre de la chaleur en élevage sont actuellement proposées. Par exemple, l'humidification de la surface de l'animal pour un refroidissement direct, favorisant ainsi les pertes de chaleur, peut être obtenue par aspersion de la surface du poulet de chair de gouttelettes d'eau grossières (Liang *et al.*, 2020). Par ce moyen, l'évaporation se produit localement sur les animaux, ce qui permet une perte de chaleur par évaporation à la surface du poulet (Wolfenson *et al.*, 2001). Mutaf *et al.* (2009) ont démontré l'efficacité du refroidissement des poules pondeuses par aspersion d'eau par intermittence au niveau de la tête et des appendices. Liang *et al.* (2014) rapportent une consommation d'eau inférieure de 66 % par refroidissement par aspersion que par un système de refroidissement par *pad cooling* (circulation d'eau dans des panneaux refroidissants alvéolés ou filtres humides) et une amélioration de l'indice de consommation sur cinq bandes de poulets de chair pendant trois étés en Arkansas.

En plus des améliorations concernant l'utilisation de l'eau, certaines études ont permis des avancées sur la régulation de la vitesse de l'air optimale en fonction des températures ambiantes. Par exemple, une vitesse de l'air de 1,5 à 2,0 m/s à 35 °C et 60 % d'humidité relative, entraîne une perte optimale de chaleur des animaux par convection sans affecter trop l'équilibre hydrique

Figure 4. Modélisation des flux d'air au niveau des animaux obtenue dans deux bâtiments types du parc français au maximum d'extraction.



Obtenu avec le logiciel Computational Fluid Dynamic (CFD).

de l'animal, améliorant leur poids vif de 11 % et leur efficacité alimentaire de 20 % (Yahav *et al.*, 2004). Pour limiter la consommation d'énergie, des systèmes de chauffage efficaces devraient être utilisés dans les élevages de poulets de chair. L'échangeur d'air récupérant la chaleur de l'air évacué pour réchauffer l'air entrant permet d'économiser une quantité considérable d'énergie, ce qui pourrait être combiné avec des systèmes améliorant le bien-être *via* une densité animale moindre sans augmenter le potentiel de réchauffement climatique comme suggéré par Leinonen *et al.* (2014). Outre la conception de bâtiments avicoles privilégiant l'isolation et la régulation fine de la température, l'accessibilité de sondes dédiées et la modélisation des flux d'air peuvent également permettre d'affiner les paramètres environnementaux (température de l'air ambiant, humidité relative, vitesse de l'air... ; figure 4) tout en maintenant une faible teneur en ammoniac à l'intérieur, en limitant la consommation d'énergie pour le chauffage et en maintenant la litière aussi sèche que possible (Guyot *et al.*, 2022). La formation de l'éleveur à l'observation du comportement de ses

poussins et poulets (répartition dans le bâtiment, maximisation de la surface d'échange des poulets avec le sol...) et le développement actuel d'outils de détection automatique de tels comportements (par vidéo notamment) sont des leviers qui permettront de mieux réguler manuellement ou automatiquement la température au niveau des poulets dans les élevages.

Pour les animaux élevés en plein air, l'orientation du bâtiment, mais aussi la présence d'arbres ou la mise en place de structures de protection contre le vent peuvent également fournir de l'ombre et des abris (Dal Bosco *et al.*, 2014 ; Chiron *et al.*, 2022). En ce qui concerne cette dernière pratique (agroforesterie), de nouveaux systèmes d'élevage en plein air à faible consommation d'intrants ont été conçus pour combiner les avantages de l'ombre et de la protection des poules pondeuses contre les prédateurs dans les vergers, tandis que les oiseaux peuvent aider à lutter contre les insectes ravageurs des arbres dans des systèmes agroécologiques. Notamment, des initiatives ont émergé en Europe pour l'élevage de poulets dans des oliveraies, ou de

poules pondeuses sous des pommiers ou noisetiers combinant les bénéfices mutuels de productions animales et végétales. De telles stratégies, ainsi que l'implantation d'arbres autour des bâtiments pour maintenir un microclimat favorable, auraient aussi un intérêt non seulement en Europe, mais aussi dans les autres régions du monde susceptibles de subir des vagues de chaleur plus fréquentes.

En Afrique où certains pays sont déjà soumis à des conditions environnementales tropicales, il est en effet essentiel d'adapter la production avicole, encore de relativement faible niveau de production (figure 1), au changement climatique pour que le continent relève le défi de nourrir une population humaine en croissance rapide de manière durable. La minimisation des facteurs de stress environnementaux peut être accomplie en employant des principes de conception simples par le biais de stratégies de gestion ou pratiques d'élevage. Par exemple, les producteurs de poulets peuvent limiter la densité de peuplement pour maintenir une température supportable par les animaux au plus chaud de la journée. En effet, l'augmentation de la densité de peuplement a un impact négatif sur le rendement des poules pondeuses (Abudabos *et al.*, 2013). Au-delà de l'orientation appropriée du poulailier et l'ombre naturelle ou artificielle, la fourniture d'une eau fraîche et de qualité aux volailles doit être promue. Les toits doivent être correctement alignés et maintenus propres. Un régime de lumière intermittente peut également aider les oiseaux à manger plus efficacement. Selon Buyse *et al.* (1994), les poussins de chair soumis à une lumière alternée dans le bâtiment produisent moins de chaleur à tous les âges qu'avec un programme à lumière quasi continue en démarrage, sauf pendant la période de croissance compensatrice vers l'âge de 35 jours.

Outre la recherche de solutions pour améliorer les capacités d'adaptation des animaux ou des systèmes d'élevage, les problèmes de santé doivent également être abordés en réponse au changement climatique avec des solutions prenant en compte les interactions

entre oiseaux et humains en accord avec les concepts « *One Health* » et « *One Welfare* » (Peyraud *et al.*, 2019).

3. Prévenir et gérer les risques sanitaires

Le changement climatique peut affecter la santé des volailles, non seulement sous les effets de l'hyperthermie engendrée par des expositions aiguës aux températures élevées (Amand *et al.*, 2003), leurs conséquences sur la santé, notamment intestinale (Rostagno, 2020), mais aussi par l'arrivée de ravageurs et de maladies dans des zones où ils n'étaient pas présents au cours des dernières décennies. En effet, des températures d'élevage plus élevées peuvent correspondre à des conditions de développement optimales de parasites ou pathogènes, dont l'expansion peut être accrue par le développement des échanges commerciaux. Par exemple, l'incidence des flambées épidémiques de virus de la grippe aviaire en Europe s'est considérablement accrue au cours des deux dernières années (Adlhoj *et al.*, 2022). Cette tendance pourrait se poursuivre à l'avenir en lien avec le réchauffement climatique, en raison des perturbations de voies de migration des oiseaux sauvages comme déjà observé aux États-Unis par Brown & Rohani (2012). En outre, l'élimination inadéquate des carcasses de volailles issues de ces épidémies a des impacts majeurs sur les environnements locaux, en particulier sur la qualité de l'eau, dans certains pays (Gerber *et al.*, 2007). Au-delà du respect strict des mesures de biosécurité pour limiter les transmissions d'origine humaine entre maillons de la chaîne et éviter l'extension des zoonoses (approche « *One Health* »), l'installation de filets autour des bâtiments d'élevage pourrait limiter le risque d'extension des maladies de la faune aviaire sauvage aux élevages, notamment en Europe. La construction de jardins d'hiver ou vérandas attendant aux bâtiments sur parcours serait là encore un moyen de limiter les interactions avec la faune sauvage tout en évitant la claustration totale des volailles. Une solution à ces épidémies serait de pratiquer systématiquement

la vaccination des volailles pour éviter les abattages massifs ; cela nécessiterait alors de renforcer les efforts de recherche à cette fin comme c'est déjà le cas pour le canard en France depuis 2023, de continuer la surveillance des élevages et de maintenir les mesures de biosécurité adéquates, et d'intégrer la vaccination dans la réglementation du commerce mondial associée à l'exportation des volailles.

Au-delà de l'extension de certains virus, le changement climatique peut favoriser le développement de certains parasites par exemple l'infestation par les acariens aviaires, comme le pou rouge (*Dermanyssus gallinae*) à mesure que la production avicole augmente, comme l'ont récemment suggéré Sparagano & Ho (2020) en Asie. Ces auteurs s'attendent à la colonisation des pays subtropicaux, où la température saisonnière est comparable à celle des régions tropicales, par l'acarien des poulets tropicaux (*Ornithonyssus bursa*). Ils signalent également que les acariens de la volaille sont potentiellement vecteurs d'autres maladies (par exemple, la maladie de Marek) et constituent une menace pour d'autres animaux ou la santé humaine. Comme la résistance aux acaricides s'est récemment accrue, par exemple au Japon (Murano *et al.*, 2015), des méthodes biologiques telles que l'utilisation d'extraits de plantes (par exemple l'huile essentielle d'ail ; Ahmed *et al.*, 2019) ou des méthodes physiques telles que des changements de rythme lumineux ou l'utilisation de gaz, pourraient être envisagées pour diminuer les populations d'acariens (Wang *et al.*, 2019 ; Kang *et al.*, 2020).

Pour réduire les impacts du changement climatique sur la production avicole, il est également nécessaire de trouver des solutions au niveau du système de production afin de prendre en compte la progression géographique des maladies liées au changement climatique. Cela implique de revoir la répartition territoriale des unités de production avicole, actuellement raisonnée par les unités de sélection et d'abattage et les marchés, et d'adapter la densité d'élevage des volailles pour limiter la vulnérabilité des filières avicoles aux épidémies, comme cela a récemment

été modélisé pour les élevages de canards (Bauzile *et al.*, 2023). En conséquence, l'étendue territoriale des sites de reproduction et des couvoirs pourrait être optimisée pour assurer l'approvisionnement local en poussins tout en maximisant la distance entre ces unités. En outre, améliorer localement les interactions entre maillons des systèmes de production (biosécurité, transports d'œufs ou d'animaux post-éclosion et pour l'abattage, de matières premières et de produits) pourrait permettre de limiter le transport d'animaux vivants, notamment en Europe, avec des avantages à la fois pour la consommation d'énergie et le bien-être animal.

Au-delà de ces considérations sanitaires et de l'adaptation de la production avicole au changement climatique, une amélioration de ses impacts environnementaux grâce à des stratégies génétiques et nutritionnelles peut atténuer ses effets sur le changement climatique.

4. Stratégies nutritionnelles d'adaptation et d'atténuation du changement climatique lié aux systèmes d'élevage avicoles

■ 4.1. Stratégies d'atténuation

En production avicole, le poste « alimentation » représente entre 50 et 80 % de l'impact carbone global « en sortie de ferme » (c'est-à-dire impact par kg de viande ou d'œufs, évalué par analyse du cycle de vie). Ainsi, la maîtrise de l'efficacité alimentaire est une clé pour limiter la contribution des productions avicoles au changement climatique. Or, l'indice de consommation (IC), c'est-à-dire la masse d'aliment ingérée par unité de gain de poids augmente chez les poulets élevés de façon chronique à haute température (Liu *et al.*, 2020). Par exemple, l'IC s'avère de 0,5 à 0,7 point plus élevé chez les poulets de chair élevés à une température de 32 à 33 °C que chez ceux élevés à une température de 22 à 23 °C (Beaumont *et al.*, 1998 ; Olfati *et al.*, 2018). Cela est principalement dû

non seulement à une baisse de l'ingéré alimentaire pour réduire la production de chaleur de l'animal, mais également à une réduction de la croissance encore plus importante (Gous & Morris, 2005). L'effet est particulièrement fort chez les poulets de chair à croissance rapide, car un taux de croissance élevé est associé à une production de chaleur plus élevée (Gous & Morris, 2005). Le gain moyen quotidien est ainsi réduit de 25 % chez les poulets de chair élevés à 33 °C par rapport aux congénères élevés à 23 °C (Olfati *et al.*, 2018). La corticostérone, hormone régulant le métabolisme et la réponse de stress des oiseaux, sécrétée pendant le stress thermique, a un effet négatif sur la consommation alimentaire, sur la digestibilité des nutriments et sur l'anatomie et la fonctionnalité du tube digestif (Olfati *et al.*, 2018).

Malgré ces forts impacts phénotypiques, le déterminisme génétique de l'efficacité alimentaire semble assez conservé à la thermoneutralité et à température élevée chez le poulet de chair. En effet, Beaumont *et al.* (1998) ont montré que les héritabilités de l'IC sont identiques à 22 °C et 32 °C (0,27-0,28). De plus, la corrélation génétique élevée et positive entre IC à 22 et 32 °C (0,74) indique que la sélection sur l'indice de consommation à la thermoneutralité aurait également un effet positif à 32 °C. Chez les poules pondeuses, Rowland *et al.* (2019) ont montré que le déterminisme génétique des caractères liés à l'efficacité alimentaire dépendait également de la durée de l'exposition à la chaleur. Si, au cours des premières semaines d'exposition à la chaleur, la consommation alimentaire, l'efficacité digestive et l'IC étaient davantage héritables pendant qu'avant l'exposition à la chaleur, l'héritabilité diminuait après quatre semaines d'exposition à la chaleur pour la consommation d'aliment et l'IC. L'influence relative de la prise de poids et de la consommation alimentaire sur l'efficacité alimentaire finale dépend également de l'âge des oiseaux, comme le montre l'évolution des corrélations génétiques entre la consommation alimentaire quotidienne, la prise de poids et l'indice de consommation final estimés chez les poulets de chair en croissance par Berger *et al.* (2022). Même si cette étude n'a pas pris en

compte des oiseaux soumis à un stress thermique, ces résultats suggèrent que les stratégies de sélection doivent être adaptées à chaque génotype en attribuant différentes pondérations à la consommation alimentaire, à la croissance et à la production d'œufs pour améliorer l'efficacité alimentaire. La disponibilité de stations d'alimentation automatiques (Howie *et al.*, 2009 ; Berger *et al.*, 2022 ; [figure 5](#)) ouvre désormais de nouvelles possibilités pour sélectionner des comportements alimentaires adaptés en cas de stress thermique. Par exemple, il est possible d'identifier les animaux qui, avec la même consommation alimentaire, mangent le plus pendant les périodes les plus fraîches de la journée, limitant ainsi les effets néfastes de la consommation d'aliment sur la production de chaleur.

■ 4.2. Stratégies d'adaptation nutritionnelle au changement climatique

Un facteur très important qui concerne l'efficacité alimentaire des volailles est le fait que le réchauffement climatique commence à entraîner une évolution de la composition de l'alimentation des volailles, qui comprendra un plus grand nombre de matières premières : il s'agit notamment de matières premières issues de végétaux mieux adaptés à la chaleur ou la sécheresse, et davantage de sous-produits de l'alimentation humaine. Ainsi Arroyo *et al.* (2013a) ont investigué la possibilité de remplacer le maïs classiquement utilisé dans l'alimentation des oies grasses, par du sorgho. Cette stratégie, malgré une qualité de foie moindre (foies plus pâles), permet d'améliorer l'efficacité alimentaire (IC réduit de 9 %) et le poids du foie des animaux (+ 13 %). Au final, le bilan environnemental de la production de foie gras d'oie est amélioré pour de nombreux impacts environnementaux évalués par analyse du cycle de vie, en particulier pour le changement climatique (- 18 %) et la consommation d'eau (- 62 %). En outre, Mignon-Grasteau *et al.* (2010) ont montré que la sélection sur l'efficacité digestive et alimentaire à l'aide d'aliments non optimaux serait plus efficace que lors de l'utilisation d'aliments optimaux, car les régimes

Figure 5. Mangeoire électronique permettant simultanément de peser les poulets et de calculer l'aliment consommé en temps réel, © INRAE.



non optimaux mettent à l'épreuve la capacité des oiseaux à s'adapter à ces régimes. Comme les corrélations génétiques entre les traits d'efficacité dans les deux régimes sont très positives, cela implique que la sélection sur un régime difficile améliorerait également l'efficacité avec des régimes optimaux.

La stratégie de sélection peut néanmoins être rendue plus complexe car, en fonction des nouveaux aliments introduits ou de l'effet des températures

élevées sur la composition des aliments incorporés, les mécanismes physiologiques affectés peuvent varier. Par exemple, Hellemans *et al.* (2018) ont montré que les grains de blé contenaient moins d'acides aminés soufrés (cystéine et méthionine) lorsque la croissance du grain se produisait pendant un épisode de chaleur. Dans ce cas, les animaux doivent s'adapter à un équilibre non optimal entre les acides aminés « réels » de la ration. Lors de la substitution de matières premières

classiques par de la pulpe de manioc ou du tourteau de noix de macadamia, l'équilibre en acides aminés n'est pas modifié par rapport aux régimes témoins, mais l'encombrement digestif est augmenté du fait de la présence de composés non digestibles, ce qui implique que la capacité du tractus gastro-intestinal peut être limitante : les animaux doivent augmenter leur consommation pour compenser une digestibilité plus faible de l'alimentation due à un transit plus rapide (Khempaka *et al.*, 2009 ; Yadav & Jha, 2021).

De nombreuses stratégies nutritionnelles ont été explorées pendant ces dernières décennies pour tenter de maintenir les performances de croissance ou de production d'œufs des volailles exposées à la chaleur. Il s'agissait d'optimiser l'équilibre hydrique, l'apport en nutriments, minéraux (notamment par la supplémentation en calcium de la poule pondeuse) et vitamines tout en tenant compte des besoins particuliers induits par le stress thermique (Renaudeau *et al.*, 2012 ; Abdel-Moneim *et al.*, 2021). Ces approches incluent par exemple l'utilisation d'additifs alimentaires pouvant affecter la physiologie, l'immunité ou le microbiote de l'animal (antioxydants naturels, minéraux, électrolytes, probiotiques...), le changement de la teneur en matières grasses et/ou en protéines dans l'alimentation, la restriction alimentaire temporaire, ou encore le taux d'humidité de la ration (Dale & Fuller, 1979 ; Dei & Bumbie, 2011 ; Attia *et al.*, 2018 ; Farghly *et al.*, 2019). L'un des processus sous-jacents de l'alimentation humide consiste à augmenter la consommation d'eau pour augmenter les pertes de chaleur de l'animal (Farghly *et al.*, 2019). La période d'alimentation peut également être structurée de manière que la production de chaleur maximale de l'animal ne coïncide pas avec le pic de température extérieure de la journée. Pour contrer les effets du stress thermique, des plantes ou extraits de plantes ayant ou supposés avoir des effets antioxydants efficaces sont de plus en plus utilisés (Abioja & Adekunle, 2019 ; Voemesse *et al.*, 2019). Parmi les composés phytochimiques ayant de telles propriétés, déjà utilisés en Afrique mais potentiellement applicables dans

d'autres zones tropicales, peuvent être cités des extraits de *Tulbaghia violacea* (tulbaghie violette, 35 g/kg), *Vitis vinifera* (vigne, 75 mg/kg) et *Artemisia afra* (absinthe africaine, 150 mg/kg) utilisés en Afrique du Sud (Naidoo *et al.*, 2008), *Moringa oleifera* utilisé au Togo et au Nigeria (arbre à raifort, Teteh *et al.*, 2013 ; Daramola, 2019), *Capsicum frutescens* utilisé en Ouganda (piment buissonnant, Sebulime *et al.*, 2021), *Manihot esculenta* utilisé au Togo (manioc, Ngueda Djeuta *et al.*, 2020) et au Cameroun (Koubala *et al.*, 2015).

Les apports en protéines et en acides aminés ont particulièrement été étudiés notamment en Europe pour leurs effets chez les poulets exposés à la chaleur, et d'autre part en raison de leur intérêt pour limiter les impacts environnementaux et le réchauffement climatique associé. Les études ont envisagé deux stratégies opposées pour atténuer les effets négatifs des températures élevées sur la croissance : *i*) l'utilisation de régimes riches en protéines pour compenser la diminution de l'apport en protéines due à la réduction de la consommation alimentaire liée à la chaleur et *ii*) l'utilisation de régimes pauvres en protéines pour limiter l'augmentation de chaleur produite par le métabolisme des protéines ou des acides aminés. Pour la première option, une augmentation de la concentration en protéines de l'aliment n'a pas eu d'effet suffisant pour aider les poulets de chair à résister à la chaleur chronique (Temim *et al.*, 2000a, 2000b). Pour la seconde, les données publiées sont contrastées et un effet bénéfique n'est pas systématiquement constaté. En effet, l'apport d'un régime pauvre en protéines (16 % vs 20 %) n'a pas empêché les effets négatifs de la chaleur en termes de performance, malgré l'ajout de lysine, de méthionine, de thréonine, d'arginine et de valine dans l'aliment pour répondre aux besoins du poulet en acides aminés les plus limitants (Alleman & Leclercq, 1997). Un concept majeur de la nutrition protéique est que l'équilibre des différents acides aminés (AA) est une condition préalable au maintien de taux optimaux de synthèse des protéines. Une explication possible est que le profil alimentaire adéquat en AA dépend de la température ambiante. Par exemple,

le besoin en arginine/lysine nécessaire au maintien de la performance pourrait augmenter à des températures élevées, probablement en raison d'une réduction de l'absorption d'arginine par le tube digestif (Balnave & Barke, 2002). Outre le rôle des acides aminés en tant que substrats de la synthèse des protéines, il est crucial de prendre en compte leur rôle fonctionnel. Par exemple, la méthionine et la cystéine sont des précurseurs du glutathion et de la taurine, qui sont des composés essentiels à la défense de l'hôte contre le stress oxydatif (Métayer *et al.*, 2008). La thréonine et la glutamine sont essentielles à la fonction de barrière épithéliale, car elles participent à la synthèse des mucines et sont utilisées comme source d'énergie par l'épithélium intestinal, respectivement (Wu *et al.*, 2018 ; Chalvon-Demersay *et al.*, 2021). Les propriétés fonctionnelles de ces acides aminés devraient contribuer à une santé et à une croissance optimale chez les poulets exposés à la chaleur en soutenant ou en restaurant le système antioxydant, la santé intestinale ou la fonction immunitaire (Dai *et al.*, 2012 ; Wu *et al.*, 2018 ; Abdel-Moneim *et al.*, 2021). D'autres rôles potentiels des acides aminés pour l'adaptation des poussins et des poulets en fin d'élevage à la chaleur, notamment sur la thermorégulation, ont été suggérés dans une revue récente (citrulline, leucine... ; Chowdhury *et al.*, 2021).

La nutrition en protéines et acides aminés peut également constituer un enjeu majeur pour une production avicole durable d'un point de vue économique, social et surtout environnemental. De manière intéressante, la réduction des protéines brutes alimentaires contribue également à réduire l'impact sur le changement climatique de l'alimentation animale dans certaines conditions, par exemple lorsque du tourteau de soja brésilien est utilisé (contribution à la déforestation et coût énergétique du transport ; Cappelaere *et al.*, 2021). En effet, en Europe, la formulation de régimes avec la contrainte de teneurs élevées en protéines brutes entraîne une incorporation massive de tourteau de soja. Cette matière première est controversée en tant qu'aliment pour les animaux en raison de la

volatilité des prix, de son impact environnemental (déforestation, transport) et de la question des OGM (organismes génétiquement modifiés). La diminution des niveaux de protéines brutes alimentaires peut réduire la dépendance au soja, mais conduit également à l'incorporation de plus grandes quantités d'acides aminés libres ou de protéagineux locaux pour maintenir l'équilibre des acides aminés alimentaires. Elle réduit également l'excrétion d'azote résultant de quantités excessives d'azote non digéré ou d'un apport excessif en acides aminés (c'est-à-dire au-delà des besoins ; Belloir *et al.*, 2017 ; Cappelaere *et al.*, 2021). Cette réduction des rejets azotés permet également d'améliorer la qualité de la litière (litière plus sèche *via* une réduction de la consommation et de l'excrétion d'eau liée à la baisse de protéines alimentaires) et contribue ainsi à un meilleur état sanitaire des animaux (réduction de la fréquence et de la sévérité des pododermatites), comme l'ont démontré Lambert *et al.* (2023). Enfin, étant donné que l'alimentation représente à la fois le principal poste du coût de production et de l'empreinte carbone de la production, l'approche de formulation multi-objectif, proposée par Garcia-Launay *et al.* (2018 ; encadré 3), est une approche pertinente pour limiter les impacts environnementaux de l'alimentation des volailles (en particulier la contribution au changement climatique), tout en maîtrisant les surcoûts des formules alimentaires (Méda *et al.*, 2021, 2023b).

Un domaine prometteur pour la nutrition des volailles concerne l'utilisation des insectes, en particulier des larves, qui nécessite encore des recherches pour éviter l'incorporation de composants antinutritionnels (chitine, acide phytique, oxalate, tannins...). Cette piste d'amélioration permettrait de proposer des aliments hautement digestibles et protéino-nutritifs dans le contexte du changement climatique qui pousse les acteurs des filières à prioriser des ressources alimentaires locales en limitant le recours au soja ayant un impact sur la déforestation. Cette stratégie pourrait également accroître le bien-être des volailles en favorisant le comportement de fourragement quand des larves vivantes

Encadré 3. Principe et intérêts de la formulation multi-objectif pour limiter la contribution de l'alimentation des volailles au changement climatique.

La méthode de formulation multi-objectif, développée par Garcia-Launay *et al.* (2018) dans le cadre du projet EcoAlim (Wilfart *et al.*, 2018) permet d'optimiser une formule alimentaire en prenant en compte simultanément le prix et les impacts environnementaux des matières premières (six impacts considérés dans la base de données EcoAlim disponible en ligne : <https://www6.inrae.fr/ecoalim/>). Pour cela, un aliment « à moindre prix » est tout d'abord formulé. Son prix et ses impacts environnementaux servent de référence pour ensuite optimiser un éco-aliment traduisant un compromis entre augmentation du prix et réduction d'un ou plusieurs impacts environnementaux. Dans cette seconde étape, un ou plusieurs impacts environnementaux peuvent être considérés simultanément, avec le poids de chaque critère considéré (prix, impacts) pouvant être défini par l'utilisateur.

Dans le tableau ci-dessous (données issues de Méda *et al.*, 2023b), des aliments pour poulet conventionnel ou biologique ont été formulés pour minimiser l'impact « changement climatique » ou trouver l'optimum entre la réduction de cet impact et l'augmentation du prix. On note que le potentiel de réduction maximale de l'impact « changement climatique » est très important (*min CC* ; -36 à -38 %) mais avec des surcoûts très élevés (+85 à +127 %), par rapport aux aliments formulés à moindre prix. En mettant en œuvre la formulation multi-objectif (*opt CC*), des réductions substantielles de l'impact « changement climatique » sont toujours possibles (-17 à -26 %), mais pour des surcoûts plus modérés (+8 à +12 %), toujours par rapport aux aliments formulés à moindre prix.

Production	Poulet Conventionnel		Poulet Biologique	
	<i>min CC</i>	<i>opt CC</i>	<i>min CC</i>	<i>opt CC</i>
Prix ¹	+85 %	+8 %	+127 %	+12 %
CC ¹	-36 %	-17 %	-38 %	-26 %

¹ Variation par rapport aux valeurs des aliments formulés à moindre prix.

sont fournies aux volailles. Cependant, la production d'insectes elle-même est un défi nécessitant la définition d'une nutrition optimale de ces insectes avec des sous-produits en combinaison avec des stratégies de sélection et de production à faible empreinte carbone et coût énergétique.

Enfin, des stratégies visant à favoriser l'économie circulaire pourraient améliorer l'efficacité des systèmes d'alimentation en diminuant la dépendance nutritionnelle vis-à-vis du soja. Des systèmes associent déjà l'aviculture et l'aquaculture dans des fermes intégrées pour en améliorer l'efficacité, en particulier pour l'élevage de canards en Asie. Toutefois, ces systèmes de production devraient faire l'objet d'études approfondies concernant leurs résultats environnementaux, en termes de déchets (nutriments, minéraux...), de pollution et de biosécurité. Ainsi, les systèmes aquacoles intégrés avec des canards présentent une prévalence plus élevée dans la communauté microbienne environnementale de gènes de résistance

aux antibiotiques que les fermes aquacoles en monoculture d'eau douce, comme l'ont démontré Xu *et al.* (2020).

Au final, prises individuellement, les solutions proposées pour adapter la production avicole au changement climatique peuvent avoir un impact limité ; cependant, il est possible de les combiner pour augmenter l'efficacité globale de la production, comme proposé au niveau local dans certaines communautés agricoles africaines n'ayant pas accès aux technologies récentes de régulation notamment thermique des bâtiments. La prise en compte de telles stratégies pourrait non seulement répondre aux besoins des animaux en termes de bien-être, limitant les changements comportementaux et physiologiques nécessaires à leur tolérance thermique, voire à leur survie en période chaude, mais aussi à ceux des éleveurs et professionnels de l'aviculture en termes de pénibilité et de satisfaction liées à leur travail. Elles répondraient également au mieux à la demande sociétale de promouvoir

l'absence d'OGM dans l'aliment, l'accès des animaux à l'extérieur, de préserver la biodiversité et d'améliorer le bien-être animal, tout en limitant la concurrence de l'alimentation animale à l'alimentation humaine, dans une démarche « *One Welfare* » qui prend en compte à la fois le bien-être animal et celui des humains ainsi que les impacts environnementaux.

Conclusion

Cette revue fournit quelques exemples de stratégies d'adaptation qui peuvent être combinés pour rendre les animaux et systèmes de production avicole plus résilients dans le contexte du changement climatique. De telles stratégies d'adaptation doivent tenir compte de la demande sociale croissante de faire évoluer les productions animales dans les perspectives d'une seule santé (« *One Health* ») et d'un seul bien-être (« *One Welfare* »). Cela nécessite de toujours prendre en compte les situations locales et d'évaluer par des approches multicritères les effets des leviers d'adaptation de la production avicole au changement climatique, en tenant compte des perspectives sociales, économiques, environnementales et de bien-être animal. Les essais actuellement entrepris en Afrique pour combiner différents leviers de lutte contre la chaleur dans une perspective agroécologique montrent une des voies à suivre pour d'autres continents également soumis au changement climatique.

Contributions des auteurs

AC a supervisé la rédaction de cet article et a pris en charge la conceptualisation et la rédaction d'une partie du manuscrit original et les révisions. VC, JKT, ST, SM-G, BM, AVC, YG, SL, FP et TZ ont rédigé les parties spécifiques à leurs expertises et revu le manuscrit.

Remerciements

Les auteurs remercient les scientifiques, techniciens, étudiants et partenaires ayant participé aux projets visant à favoriser l'adaptation des systèmes d'élevage avicoles au changement

climatique. Une partie des stratégies de recherche présentées ont été étudiées au cours des projets ANR-15-CE02-0009-01 QuailHeatE, ANR-09-JCJC-0015-01

THERMOCHICK et ANR-13-ADAPT CHICKSTRESS, des projets financés par la Banque mondiale (projet CERSA IDA 2454), et le projet H2020 PPILOW. Le

projet PPILOW a reçu un financement du programme Horizon 2020 Recherche et Innovation de l'Union européenne sous l'accord de financement N° 816172.

Références

- Abdel-Moneim, A. E., Shehata, A. M., Khidr, R. E., Paswan, V. K., Ibrahim, N. S., El-Ghoul, A. A., Al-Dhumri, S. A., Gabr, S. A., Mesalam, N. M., Elbaz, A. M., Elsayed, M. A., Wakwak, M., & Ebeid, T. A. (2021). Nutritional manipulation to combat heat stress in poultry – A comprehensive review. *Journal of Thermal Biology*, 98, 102915. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102915>
- Abín, R., Laca, A., Laca, A., & Diáz, M. (2018). Environmental assesment of intensive egg production: A Spanish case study. *Journal Of Cleaner Production*, 179, 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.067>
- Abioja, M. O., & Adekunle, M. O. (2019). Climate change: Depression in egg production in chickens during the hot season with long-term honey administration. In: W. Leal Filho. (eds) *Handbook of climate change resilience* (pp. 717-727). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93336-8_15
- Abudabos, A. M., Samara, E. M., Hussein, E. O., Al-Ghadi, M. Q., & Al-Atiyat, R. M. (2013). Impacts of stocking density on the performance and welfare of broiler chickens. *Italian Journal of Animal Science*, 12(1), e11. <https://doi.org/10.4081/ijas.2013.e11>
- Adlhoch, C., Fusaro, A., Gonzáles, J. L., Kuiken, T., Marangon, S., Niqueux, É., Staubach, C., Terregino, C., Aznar, I., Guajardo, I. M., & Baldinelli, F. (2022). Avian Influenza overview. *EFSA Journal*, 20(4), e07289. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.7289>
- Adomako, K., Hagan, J.K., & Olympio, O.S. (2010). Egg production performance of first and second filial generation naked neck (NANA, Nana) and normal feathered (nana) birds of a cross between indigenous naked neck (NANA, Nana) males and exotic commercial females (nana). *Livestock Research and Rural Development*, 22(12). <http://www.lrrd.org/lrrd22/12/adom22223.htm>
- Adomako, K., Olympio, O., Hagan, J. K., & Hamidu, J. (2014). Effect of the frizzle gene (F) on egg production and egg quality of laying hens kept in tropical villages. *British Poultry Science*, 55(6), 709-714. <https://doi.org/10.1080/00071668.2014.963026>
- Ahmed, S.E., Thamar, N.K., & Othman, R.M. (2019). Effect of garlic oil extract on blood parameters in chickens infected with ectoparasites. *Basrah Journal of Veterinary Research*, 18(2), 195-207. [10.23975/BJVETR.2022.172811](https://doi.org/10.23975/BJVETR.2022.172811)
- Alleman, F., & Leclercq, B. (1997). Effect of dietary protein and environmental temperature on growth performance and water consumption of male broiler chickens. *British Poultry Science*, 38(5), 607-610. <https://doi.org/10.1080/00071669708418044>
- Arroyo, J., Aubin, J., Auvergne, A., Dubois, J., Brachet, M., Fernández, X., Debaeke, P., & Fortun-Lamothe, L. (2013a). Conception et évaluation d'un système innovant de production de foie gras : le cas de la substitution du maïs par du sorgho chez l'oie. Dans : L. Fortun-Lamothe (Coord.), *Dossier : Palmipèdes à foie gras, INRA Productions Animales*, 26(5), 435-448. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2013.26.5.3172>
- Arroyo, J., Fortun-Lamothe, L., Auvergne, A., Dubois, J.P., Lavigne, F., Bijja, M., & Aubin, J. (2013b). Environmental influence of maize substitution by sorghum and diet presentation on goose foie gras production. *Journal Of Cleaner Production*, 59, 51-62. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.051>
- Asumah, C., Adomako, K., Olympio, O.S., Hagan, B. A., & Yeboah, E. D. (2022). Influence of thermoregulatory (Na & F) genes on performance and blood parameters of F₂ and F₃ generations of crosses of local and commercial chickens. *Tropical Animal Health and Production*, 54(4). <https://doi.org/10.1007/s11250-022-03207-6>
- Attia, Y.A., Al-Harhi, M.A., & Elnaggar, A.S. (2018). Productive, physiological and immunological responses of two broiler strains fed different dietary regimens and exposed to heat stress. *Italian Journal of Animal Science*, 17(3), 686-697. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2017.1416961>
- Balnave, D., & Barke, J., (2002). Re-evaluation of the classical dietary arginine:lysine interaction for modern poultry diets: a review. *World's Poultry Science Journal*, 58(3), 275-289. <https://doi.org/10.1079/WPS20020021>
- Bauzile, B., Durand, B., Lambert, S., Rautureau, S., Fourtune, L., Guinat, C., Andronico, A., Cauchemez, S., Paul, M., & Vergne, T. (2023). Impact of palmiped farm density on the resilience of the poultry sector to highly pathogenic avian influenza H5N8 in France. *Veterinary Research*, 54(1). <https://doi.org/10.1186/s13567-023-01183-9>
- Beaumont, C., Guillaumin, S., Geraert, P. A., Mignon-Grasteau, S., & Leclercq, B. (1998). Genetic parameters of body weight of broiler chickens measured at 22°C or 32°C. *British Poultry Science*, 39(4), 488-491. <https://doi.org/10.1080/00071669888647>
- Belloir, P., Méda, B., Lambert, W., Corrent, E., Juin, H., Lessire, M., & Tesseraud, S. (2017). Reducing the CP content in broiler feeds: impact on animal performance, meat quality and nitrogen utilization. *Animal*, 11(11), 1881-1889. <https://doi.org/10.1017/s17571731117000660>
- Berger, Q., Guettier, E., Bernard, J., Ganier, P., Chahnamian, M., Le Bihan-Duval, É., & Mignon-
- Grasteau, S. (2022). Profiles of genetic parameters of body weight and feed efficiency in two divergent broiler lines for meat ultimate pH. *BMC Genomic Data*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12863-022-01035-z>
- Bohren, B. B., Rogler, J. C., & Carson, J. R. (1982). Performance at two rearing temperatures of white leghorn lines selected for increased and decreased survival under heat stress. *Poultry Science*, 67(10), 1939-1943. <https://doi.org/10.3382/ps.0611939>
- Brown, V. L., & Rohani, P. (2012). The consequences of climate change at an avian influenza "hotspot". *Biology Letters*, 8(6), 1036-1039. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2012.0635>
- Buyse, J., Decuypere, E., & Michels, H. (1994). Intermittent lighting and broiler production 2. Effect on energy and on nitrogen metabolism. *Archiv für Geflügelkunde*, 58, 78-83. <https://www.european-poultry-science.com/intermittent-lighting-and-broiler-production-2-effect-on-energy-and-on-nitrogen-metabolism.QUIEPTUxMzg2MjAmTUIEPT2MTAxNA.html>
- Cahaner, A., Ajuh, J. A., Siegmund-Schultze, M., Azoulay, Y., Druyan, S., & Valle Zárate, A. (2008). Effects of the genetically reduced feather coverage in naked neck and featherless broilers on their performance under hot conditions. *Poultry Science*, 87(12), 2517-2527. <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00284>
- Cappelaere, L., Le Cour Grandmaison, J., Martin, N., & Lambert, W. (2021). Amino acid supplementation to reduce environmental impacts of broiler and pig production: a review. *Frontiers in Veterinary Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.689259>
- Cedraz, H., Gromboni, J. G. G., García, A. A. P., Farias Filho, R. V., Souza, T. M., De Oliveira, E. R., De Oliveira, E. B., do Nascimento, C. S., Meneghetti, C., & Wenceslau, A. A. (2017). Heat stress induces expression of HSP genes in genetically divergent chickens. *PLoS ONE*, 12(10), e0186083. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186083>
- Chalvon-Demersay, T., Luise, D., Le Floc'h, N., Tesseraud, S., Lambert, W., Bosi, P., Trevisi, P., Beaumont, M., & Corrent, E. (2021). Functional amino acids in pigs and chickens: Implication for gut health. *Frontiers in Veterinary Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.663727>
- Chen, C.-F., Gourichon, D., Huang, N.-Z., Lee, Y., Bordas, A., & Tixier-Boichard, M. (2009). Performance comparison of dwarf laying hens segregating for the naked neck gene in temperate and subtropical environments. *Genetics Selection Evolution*, 41(1). <https://doi.org/10.1186/1297-9686-41-13>

- Chiron, G., Pertusa, M., Méda, B., Protino, J., Fortun-Lamothe, L., Liagre, F., Gross, H., Parizel, A., Tavares, O., Fontanet, J.-M., & Bouvarel, I. (2022). *Évaluer les services rendus par un atelier de volailles avec parcours: le cadre méthodologique BOUQUET*. 14^e Journées de la recherche avicole et palmipèdes à foie gras, Tours. <https://www.itavi.asso.fr/publications/evaluer-les-services-rendus-par-un-atelier-de-volailles-avec-parcours-le-cadre-methodologique-bouquet?search=bouquet&order=score&years=2>
- Chowdhury, V. S., Han, G., Eltahan, H. M., Haraguchi, S., Gilbert, E. R., Cline, M. A., Cockrem, J. F., Bungo, T., & Furuse, M. (2021). Potential role of amino acids in the adaptation of chicks and Market-Age broilers to heat stress. *Frontiers in Veterinary Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.610541>
- Collin, A., Berri, C., Tesseraud, S., Rodon, F. E. R., Skiba-Cassy, S., Crochet, S., Duclos, M. J., Rideau, N., Tona, K., Buyse, J., Bruggeman, V., Decuypere, E., Picard, M., & Yahav, S. (2007). Effects of thermal manipulation during early and late embryogenesis on thermotolerance and breast muscle characteristics in broiler chickens. *Poultry Science*, 86(5), 795-800. <https://doi.org/10.1093/ps/86.5.795>
- Collin, A., Coustham, V., Tona, J.K., Tesseraud, S., Mignon-Grasteau, S., Lagarrigue, S., Pitel, F., & Zerjal, T. (2022). *Combined strategies for adapting poultry production to climate change*. World's poultry Congress, Paris, 122-146. <https://www.wpsa.com/index.php/publications/wpsa-proceedings/world-s-poultry-congresses/xxvi-world-s-poultry-congress-2022>
- Costantini, M., Lovarelli, D., Orsi, L., Ganzaroli, A., Ferrante, V., Febo, P., Guarino, M., & Bacenetti, J. (2020). Investigating on the environmental sustainability of animal products: The case of organic eggs. *Journal Of Cleaner Production*, 274, 123046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123046>
- Da Silva, V. P., Van Der Werf, H. M., Soares, S. R., & Corson, M. S. (2014). Environmental impacts of French and Brazilian broiler chicken production scenarios: An LCA approach. *Journal Of Environmental Management*, 133, 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.011>
- Dai, S., Gao, F., Xu, X., Zhang, W., Song, S., & Zhou, G. (2012). Effects of dietary glutamine and gamma-aminobutyric acid on meat colour, pH, composition, and water-holding characteristic in broilers under cyclic heat stress. *British Poultry Science*, 53(4), 471-481. <https://doi.org/10.1080/00071668.2012.719148>
- Dal Bosco, A., Mugnai, C., Rosati, A., Paoletti, A., Caporali, S., & Castellini, C. (2014). Effect of range enrichment on performance, behavior, and forage intake of free-range chickens. *Journal of Applied Poultry Research*, 23(2), 137-145. <https://doi.org/10.3382/japr.2013-00814>
- Dale, N.M., & Fuller, H.L. (1979). Effects of diet composition on feed intake and growth of chicks under heat stress. I. Dietary fat levels. *Poultry Science*, 58(6), 1529-1534. <https://doi.org/10.3382/ps.0581529>
- Daramola, O.T. (2019). Medicinal plants leaf meal supplementation in broiler chicken diet: effects on performance characteristics, serum metabolite and antioxidant status. *Animal Research International*, 16(2), 3334-3342. <https://www.ajol.info/index.php/ari/article/view/189520>
- David, S.-A., Carvalho, A. V., Gimonet, C., Brionne, A., Hennequet-Antier, C., Piégu, B., Crochet, S., Couroussé, N., Bordeau, T., Bigot, Y., Collin, A., & Coustham, V. (2019). Thermal manipulation during embryogenesis impacts H3K4me3 and H3K27me3 Histone marks in chicken hypothalamus. *Frontiers in Genetics*, 10. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.01207>
- De Souza Morita, V., De Almeida, V.R., Matos, J.B., Vicentini, T. I., Van Den Brand, H., & Boleli, I.C. (2016). Incubation temperature during fetal development influences morphophysiological characteristics and preferred ambient temperature of chicken hatchlings. *PLoS ONE*, 11(5), e0154928. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154928>
- De Vries, M., & De Boer, I. J. M. (2010). Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science*, 128(1-3), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.11.007>
- Dei, H. K., & Bumbie, G. Z. (2011). Effect of wet feeding on growth performance of broiler chickens in a hot climate. *British Poultry Science*, 52(1), 82-85. <https://doi.org/10.1080/00071668.2010.540230>
- Dekker, S. E. M., De Boer, I. J. M., Vermeij, I., Aarnink, A. J. A., & Groot Koerkamp, P. W. G. (2011). Ecological and economic evaluation of Dutch egg production systems. *Livestock Science*, 139(1-2), 109-121. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.03.011>
- Dou, J., Schenkel, F., Hu, L., Khan, A., Khan, M. Z., Yu, Y., & Wang, Y. (2021). Genome-wide identification and functional prediction of long non-coding RNAs in Sprague-Dawley rats during heat stress. *BMC Genomics*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12864-021-07421-8>
- Dunkley, C.S., & Dunkley, K.D. (2013). Greenhouse Gas Emissions from Livestock and Poultry. *Agriculture, Food and Analytical Bacteriology*, 3, 17-29. <https://poultry.caes.uga.edu/content/dam/caes-subsite/poultry/documents/greenhouse-gas-emissions-from-livestock-poultry.pdf>
- FAO (2017). Livestock solutions for climate change. I8098EN/2/12.1.
- FAOSTAT (2024). Cultures et produits animaux. <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL>
- Farghly, M. F. A., Galal, A., & Ahmad, E. A.M. (2019). Using wet feed in feeding Japanese Quail under summer conditions. *Egyptian Poultry Science Journal*, 39(2), 391-403. <https://doi.org/10.21608/epsj.2019.35035>
- Farrant, L., Labau, M. P., Padilla, M., Deneufbourg, C., Fortun-Lamothe, L., Penavayre, S., & Besnier, A. (2018). Évaluation de la durabilité de la filière Indication Géographique Protégée « Canard à foie gras du Sud-Ouest ». *INRA Productions Animales*, 31(2), 131-144. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2018.31.2.2319>
- Garcia-Launay, F., Dusart, L., Espagnol, S., Laisse-Redoux, S., Gaudré, D., Méda, B., & Wilfart, A. (2018). Multiobjective formulation is an effective method to reduce environmental impacts of livestock feeds. *British Journal of Nutrition*, 120(11), 1298-1309. <https://doi.org/10.1017/s0007114518002672>
- Gerber, P., Opio, C., & Steinfeld, H. (2007). Poultry production and the environment – a review. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Consulté le 3 juin 2022 sur https://www.fao.org/ag/againfo/home/events/bangkok2007/docs/part2/2_2.pdf
- Ghasempour, A., & Ahmadi, E. (2016). Assessment of environment impacts of egg production chain using life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 183, 980-987. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.054>
- Gheyas, A. A., Vallejo-Trujillo, A., Kebede, A., Lozano-Jaramillo, M., Dessie, T., Smith, J., & Hanotte, O. (2021). Integrated environmental and genomic analysis reveals the drivers of local adaptation in African Indigenous chickens. *Molecular Biology and Evolution*, 38(10), 4268-4285. <https://doi.org/10.1093/molbev/msab156>
- González-García, S., Gomez-Fernández, Z., Dias, A. C., Feijoo, G., Moreira, M. T., & Arroja, L. (2014). Life Cycle Assessment of broiler chicken production: a Portuguese case study. *Journal of Cleaner Production*, 74, 125-134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.067>
- Gous, R. M., & Morris, T. R. (2005). Nutritional interventions in alleviating the effects of high temperatures in broiler production. *Worlds Poultry Science Journal*, 61(3), 463-475. <https://doi.org/10.1079/wps200568>
- Guerrero-Bosagna, C., Morisson, M., Liaubet, L., Rodenburg, T., De Haas, E. N., Košťál, L., & Pitel, F. (2018). Transgenerational epigenetic inheritance in birds. *Environmental Epigenetics*, 4(2). <https://doi.org/10.1093/eep/dvy008>
- Guyot, Y., Cissé, S., & Quentin, M., (2022). *Modélisations tri-dimensionnelles des vitesses d'air au niveau des poulets de chair en cas de fortes chaleurs*. 14^e Journées de la recherche avicole et palmipèdes à foie gras, Tours. <https://www.itavi.asso.fr/publications/modelisations-tridimensionnelles-des-vitesses-d-air-au-niveau-des-poulets-de-chair-en-cas-de-fortes-chaleurs>
- Gwaza, D. S., & Nachi, E. D. (2015). Effect of naked neck gene on egg and body weight of chickens 30 on free range in selected nigerian local chicken populations. *Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 8(2), 119-122. <https://www.iosrjournals.org/iosr-javs/papers/vol8-issue2/Version-2/U0822119122.pdf>
- Hellemans, T., Landschoot, S., Dewitte, K., Van Bockstaele, F., Vermeir, P., Eeckhout, M., & Haesaert, G. (2018). Impact of crop husbandry practices and environmental conditions on wheat composition and quality: a review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(11), 2491-2509. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b05450>

- Howie, J. A., Tolkamp, B. J., Avendaño, S., & Kyriazakis, I. (2009). The structure of feeding behavior in commercial broiler lines selected for different growth rates. *Poultry Science*, 88(6), 1143-1150. <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00441>
- Ibtisham, F., An, L., Li, T., Niu, Y., Xiao, M., Zhang, L., & Jia, R. (2017). Growth patterns of two Chinese native goose breeds. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 19(2), 203-210. <https://doi.org/10.1590/1806-9061-2016-0395>
- IPCC (2022). IPCC WGI Interactive Atlas. IPCC Working Group I (WGI): Sixth Assessment Report. <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>
- Kang, J., Hossain, A., Jeong, J., Park, H., Kim, J. H., Kang, M., Kwon, Y., Kim, Y. S., & Park, S. W. (2020). Application of carbon dioxide as a novel approach to eradicate poultry red mites. *Journal of Veterinary Science*, 21(2). <https://doi.org/10.4142/jvs.2020.21.e37>
- Kheiralipour, K., Payandeh, Z. & Khoshnevisan, B. (2017). Evaluation of environmental impacts in Turkey production system in Iran. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, 7, 507-512. https://ijas.rasht.iau.ir/article_533296_a81252dc7a4d7756afd38a-4c2a0f905.pdf
- Khempaka, S., Molee, W., & Guillaume, M. (2009). Dried cassava pulp as an alternative feedstuff for broilers: effect on growth performance, carcass traits, digestive organs, and nutrient digestibility. *Journal of Applied Poultry Research*, 18(3), 487-493. <https://doi.org/10.3382/japr.2008-00124>
- Kisliouk, T., Cramer, T., & Meiri, N. (2017). Methyl CPG level at distal part of heat-shock protein promoter *HSP70* exhibits epigenetic memory for heat stress by modulating recruitment of POU2F1-associated nucleosome-remodeling deacetylase (NuRD) complex. *Journal of Neurochemistry*, 141(3), 358-372. <https://doi.org/10.1111/jnc.14014>
- Koubala, B. B., Laya, A., Massaï, H., Kouninki, H., & Nukenine, E. N. (2015). Physico-chemical characterization Leaves from five genotypes of cassava (*Manihot esculenta* crantz) consumed in the Far North region (Cameroon). *American Journal of Food Science and Technology*, 3(2), 40-47. <https://pubs.sciepub.com/ajfst/3/2/3/>
- Lambert, W., Berrocoso, J. D., Swart, B., Van Tol, M., Bruininx, E., & Willems, E. (2023). Reducing dietary crude protein in broiler diets positively affects litter quality without compromising growth performance whereas a reduction in dietary electrolyte balance further improves litter quality but worsens feed efficiency. *Animal Feed Science and Technology*, 297, 115571. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115571>
- Lan, X., Hsieh, J. C. F., Schmidt, C. J., Zhu, Q., & Lamont, S. J. (2016). Liver transcriptome response to hyperthermic stress in three distinct chicken lines. *BMC Genomics*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s12864-016-3291-0>
- Le Centre d'information sur l'eau (2022). Quelles sont les ressources en eau dans le monde ? Consulté le 30/01/2023 sur : <https://www.cieau.com/connaître-leau/les-ressources-en-france-et-dans-le-monde/ou-en-sont-les-ressources-en-eau-dans-le-monde/>
- Leinonen, I., Williams, A. G., Wiseman, J., Guy, J., & Kyriazakis, I. (2012a). Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Broiler production systems. *Poultry Science*, 91(1), 8-25. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-01634>
- Leinonen, I., Williams, A. G., Wiseman, J., Guy, J., & Kyriazakis, I. (2012b). Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Egg production systems. *Poultry Science*, 91(1), 26-40. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-01635>
- Leinonen, I., Williams, A. G., & Kyriazakis, I. (2014). The effects of welfare-enhancing system changes on the environmental impacts of broiler and egg production. *Poultry Science*, 93(2), 256-266. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03252>
- Leinonen, I., Williams, A., & Kyriazakis, I. (2016). Comparing the environmental impacts of UK turkey production systems using analytical error propagation in uncertainty analysis. *Journal of Cleaner Production*, 112, 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.024>
- Leroy, F., Abraini, F., Beal, T., Dominguez-Salas, P., Gregorini, P., Manzano, P., Rowntree, J., & van Vliet S. (2022). Animal board invited review: Animal source foods in healthy, sustainable, and ethical diets – An argument against drastic limitation of livestock in the food system. *Animal*, 16(3), 100457. Liang, Y., Tabler, G. T., Costello, T. A., Berry, I.L., Watkins, S. E. & Thaxton, Y. V. (2014). Cooling broiler chickens by surface wetting: indoor thermal environment, water usage and bird performance. *Applied Engineering in Agriculture*, 30(2), 249-258. <https://doi.org/10.13031/aea.30.10103>
- Liang, Y., Tabler, G.T., & Dridi, S. (2020). Sprinkler technology improves broiler production sustainability: from stress alleviation to water usage conservation: a mini review. *Frontiers in Veterinary Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.544814>
- Liu, L., Ren, M., Ren, K., Jin, Y., & Yan, M. (2020). Heat stress impacts on broiler performance: a systematic review and meta-analysis. *Poultry Science*, 99, 6205-6211. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.08.019>
- López-Andrés, J.J., Aguilar-Lasserre, A.A., Morales-Mendoza, L.F., Azzaro-Pantel, C., Pérez-Gallardo, J.R., & Rico-Contreras, J.O. (2018). Environmental impact assessment of chicken meat production via an integrated methodology based on LCA, simulation and genetic algorithms. *Journal of Cleaner Production*, 174, 477-491. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.307>
- Loyau, T., Berri, C., Bedrani, L., Métayer-Coustard, S., Praud, C., Duclos, M.J., Tesseraud, S., Rideau, N., Everaert, N., Yahav, S., Mignon-Grasteau, S., & Collin, A. (2013). Thermal manipulation of the embryo modifies the physiology and body composition of broiler chickens reared in floor pens without affecting breast meat processing quality. *Journal of Animal Science*, 91(8), 3674-3685. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6445>
- Loyau, T., Bedrani, L., Berri, C., Métayer-Coustard, S., Praud, C., Coustham, V., Mignon-Grasteau, S., Duclos, M.J., Tesseraud, S., Rideau, N., Hennequet-Antier, C., Everaert, N., Yahav, S., & Collin, A. (2015). Cyclic variations in incubation conditions induce adaptive responses to later heat exposure in chickens: A review. *Animal*, 9(1), 76-85. <https://doi.org/10.1017/S1751731114001931>
- Loyau, T., Hennequet-Antier, C., Coustham, V., Berri, C., Leduc, M., Crochet, S., Sannier, M., Duclos, M.J., Mignon-Grasteau, S., Tesseraud, S., Briconne, A., Métayer-Coustard, S., Moroldo, M., Lecardonnell, J., Martin, P., Lagarrigue, S., Yahav, S., & Collin, A. (2016a). Thermal manipulation of the chicken embryo triggers differential gene expression in response to a later heat challenge. *BMC Genomics*, 17, 329. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-2661-y>
- Loyau, T., Zerjal, T., Rodenburg, T.B., Fablet, J., Tixier-Boichard, M., Pinard-Van der Laan, M.-H., & Mignon-Grasteau, S. (2016b). Heritability of body surface temperature in hens estimated by infrared thermography at normal or hot temperatures and genetic correlations with egg and feather quality. *Animal*, 10(10), 1594-1601. <https://doi.org/10.1017/S1751731116000616>
- Massimino, W., Davail, S., Bernadet, M.D., Pioche, T., Tavernier, A., Ricaud, K., Gontier, K., Bonnefont, C., Manse, H., Morisson, M., Fauconneau, B., Collin, A., Panserat, S., & Houssier, M. (2019). Positive impact of thermal manipulation during embryogenesis on foie gras production in mule ducks. *Frontiers in Physiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01495>
- Masson-Delmotte, V., & Zhai, P. (2022). Regional trends in extreme events in the IPCC 2021 report, *WMO Bulletin*, 71(1), 2022. <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/regional-trends-extreme-events-ipcc-2021-report>.
- Méda, B., Belloir, P., Lessire, M., Juin, H., Corrent, E., Lambert, W., & Tesseraud, S. (2017). Réduction du taux protéique dans l'aliment finition chez le poulet de chair : Conséquences environnementales. 12^e Journées de la recherche avicole et palmipèdes à foie gras, Tours. <https://hal.science/hal-01607178>
- Méda, B., Garcia-Launay, F., Dusart, L., Ponchant, P., Espagnol, S., & Wilfart, A. (2021). Reducing environmental impacts of feed using multiobjective formulation: What benefits at the farm gate for pig and broiler production? *Animal*, 15(1), 100024. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100024>
- Méda, B., Barlier, E., Péchernart, E., Limier, J.-Y., & Mignon-Grasteau, S. (2023a). *Environmental and economic assessment of a French free-range chicken production system*. 74th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science, Lyon, p.467. <https://hal.inrae.fr/hal-04200348>.
- Méda, B., Jessus, L., Denoual, P., & Garcia-Launay, F. (2023b). *Formulation of eco-friendly feeds for conventional and organic poultry to reduce feed-food competition, greenhouse gas emissions, and land use*. 23rd European Symposium on Poultry Nutrition, Rimini, p. 97. https://wpsa.com/images/downloads/tables_of_contents/ESPN_2023_Book_of_Abstracts.pdf

- Métayer, S., Seiliez, I., Collin, A., Duchêne, S., Mercier, Y., Geraert, P. A., & Tesserand, S. (2008). Mechanisms through which sulfur amino acids control protein metabolism and oxidative status. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 19(4), 207-215. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2007.05.006>
- Meteyake, H.T., Collin, A., Bilalissi, A., Dassidi, N., Assion, M.E.P., & Tona, K. (2023). Naked neck gene and intermittent thermal manipulations during embryogenesis improve posthatch performance and thermotolerance in slow-growing chickens under tropical climates. *Poultry Science*, 102(10), 102912. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102912>
- Mignon-Grasteau, S., Juin, H., Sellier, N., Bastianelli, D., Gomez, J., & Carré B. (2010). *Genetic parameters of digestibility of wheat- or corn-based diets in chickens*. 9th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Leipzig. <https://hal.inrae.fr/hal-02754489>
- Murano, T., Namiki, K., Shiina, K., & Yasukawa, H. (2015). Resistance development of *Dermatophagoides* against commercial acaricides in poultry farms in Japan. *Journal of the Japan Veterinary Medical Association*, 68(8), 509-514. <https://doi.org/10.12935/jvma.68.509>
- Mutaf, S., Kahraman, N. S., & Firat, M. Z. (2009). Intermittent partial surface wetting and its effect on body-surface temperatures and egg production of white and brown domestic laying hens in Antalya (Turkey). *British Poultry Science*, 50(1), 33-38. <https://doi.org/10.1080/00071660802592399>
- Naidoo, V., McGaw, L. J., Bisschop, S. P. R., Duncan, N., & Eloff, J. N. (2008). The value of plant extracts with antioxidant activity in attenuating coccidiosis in broiler chickens. *Veterinary Parasitology*, 153(3-4), 214-219. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2008.02.013>
- Ngueda Djéuta, O., Voemesse, K., Tete, A., Gbéassor, M., Decuyper, E., & Tona, K. (2020). Nutritional effects of dietary inclusion of *Manihot Esculenta* Crantz leaf on Isa Brown older layers performance. *International Journal of Poultry Science*, 19(4), 142-146. <https://doi.org/10.3923/ijps.2020.142.146>
- Nyuiadz, D., Méda, B., Dusart, L., Berri, C., Travel, A., Guilloteau, L.A., Leterrier, C., Coustham, V., Mignon-Grasteau, S., Wang, Y., Bouvarel, I., Tona, J. K., & Collin A. (2017). *Effets d'une acclimatation embryonnaire au froid visant à améliorer les capacités d'adaptation du poulet de chair*. 12^e Journées de la recherche avicole et palmipèdes à foie gras, Tours.
- Nyuiadz, D., Berri, C., Dusart, L., Travel, A., Méda, B., Bouvarel, I., Guilloteau, L. A., Chartrin, P., Coustham, V., Praud, C., Le Bihan-Duval, É., Tona, J. K., & Collin, A. (2020). Short cold exposures during incubation and postnatal cold temperature affect performance, breast meat quality, and welfare parameters in broiler chickens. *Poultry Science*, 99(2), 857-868. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.10.024>
- OECD/FAO (2020). "OECD-FAO Agricultural Outlook", *OECD Agriculture statistics (database)*, <http://dx.doi.org/10.1787/agr-outl-data-en>
- Olfati, A., Mojtahedin, A., Sadeghi, T., Akbari, M., & Martinez-Pastor, F. (2018). Comparison of growth performance and immune responses of broiler chicks reared under heat stress, cold stress and thermoneutral conditions. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 16(2), e0505. <https://doi.org/10.5424/sjar/2018162-12753>
- Pawar, S. S., Sajjanar, B., Lonkar, V. D., Pandurang, K. N., Sahebrao, K. A., Vitthal, N. A., Pandit, B. M., & Kumar, B. S. (2016). Assessing and mitigating the impact of heat stress in poultry. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 4(6), 332-341. <https://doi.org/10.14737/journal.aavs/2016/4.6.332.341>
- Pelletier, N. (2008). Environmental performance in the US broiler poultry sector: Life cycle energy use and greenhouse gas, ozone depleting, acidifying and eutrophying emissions. *Agricultural Systems*, 98(2), 67-73. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2008.03.007>
- Pelletier, N. (2017). Life cycle assessment of Canadian egg products, with differentiation by hen housing system type. *Journal of Cleaner Production*, 152, 167-180. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.050>
- Pelletier, N., Ibarburu, M., & Xin, H. (2014). Comparison of the environmental footprint of the egg industry in the United States in 1960 and 2010. *Poultry Science*, 93(2), 241-255. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03390>
- Peyraud, J.-L., Aubin, J., Barbier, M., Baumont, R., Berri, C., Bidanel, J.-P., Citti, C., Cotinot, C., Ducrot, C., Dupraz, P., Faverdin, P., Friggens, N., Houot, S., Nozières-Petit, M.-O., Rogel-Gaillard, C., Santé-Lhoutellier, V. (2019). Quelle science pour les élevages de demain ? Une réflexion prospective conduite à l'INRA. Dans : R. Baumont (Coord.), *Numéro spécial : De grands défis et des solutions pour l'élevage*. INRA Productions Animales, 32, 323-338. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2591>
- Piestun, Y., Shinder, D., Ruzal, M., Halevy, O., Brake, J., & Yahav, S. (2008). Thermal manipulations during broiler embryogenesis: Effect on the acquisition of thermotolerance. *Poultry Science*, 87(8), 1516-1525. <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00030>
- Piestun, Y., Harel, M., Barak, M., Yahav, S., & Halevy, O. (2009). Thermal manipulations in late-term chick embryos have immediate and longer term effects on myoblast proliferation and skeletal muscle hypertrophy. *Journal of Applied Physiology*, 106(1), 233-240. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.91090.2008>
- Quinteiro-Filho, W. M., Gomes, A. V. S., Pinheiro, M. L., Ribeiro, A., Ferraz-De-Paula, V., Astolfi-Ferreira, C. S., Ferreira, A. J. P., & Palermo-Neto, J. (2012). Heat stress impairs performance and induces intestinal inflammation in broiler chickens infected with *Salmonella* Enteritidis. *Avian Pathology*, 41(5), 421-427. <https://doi.org/10.1080/03079457.2012.709315>
- Ramedani, Z., Alimohammadian, L., Kheilipour, K., Delpisheh, P., & Abbasi, Z. (2019). Comparing energy state and environmental impacts in ostrich and chicken production systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(27), 28284-28293. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05972-8>
- Renaudeau, D., Collin, A., Yahav, S., De Basilio, V., Gourdière, J. L., & Collier, R. J. (2012). Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Animal*, 6(5), 707-728. <https://doi.org/10.1017/s1751731111002448>
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S., Donges, J. F., Druke, M., Fetzer, I., Bala, G., Von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., Petri, S., Porkka, M., Rahmstorf, S., Schaphoff, S., Thonicke, K., Tobian, A., Virkki, V., Wang-Erlandsson, L., Weber, L., Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- Rostagno, M. H. (2020). Effects of heat stress on the gut health of poultry. *Journal of Animal Science*, 98(4), skaa090. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa090>
- Rowland, K., Ashwell, C. M., Persia, M. E., Rothschild, M. F., Schmidt, C., & Lamont, S. J. (2019). Genetic analysis of production, physiological, and egg quality traits in heat-challenged commercial white egg-laying hens using 600k SNP array data. *Genetics Selection Evolution*, 51(1). <https://doi.org/10.1186/s12711-019-0474-6>
- Santos, R. R., Awati, A., Roubos-van den Hil, P. J., Tersteeg-Zijderveld, M. H. G., Koolmees, P. A., & Fink-Gremmels, J. (2015). Quantitative histo-morphometric analysis of heat-stress-related damage in the small intestines of broiler chickens. *Avian Pathology*, 44(1), 19-22. <https://doi.org/10.1080/03079457.2014.988122>
- Sebulime, P., Ocaido, M., & Okello, S. (2021). Phytochemical composition of *Capsicum frutescens* and its effect on body weight and carcass yield of Cobb500 broilers. *African Journal of Agricultural Research*, 17(6), 869-874. <https://doi.org/10.5897/ajar2021.15468>
- Seguin, F., Bouvarel, I., Pottiez, E., & van der Werf, H. (2013). *Analyse du cycle de vie des produits avicoles biologiques en France*. 10^e Journées de la recherche avicole et palmipèdes à foie gras, La Rochelle. <https://www.itavi.asso.fr/publications/analyse-du-cycle-de-vie-des-produits-avicoles-biologiques-en-france?search=analyse%20du%20cycle%20de%20vie%20des%20produits%20avicoles&eventTypes=1&order=date&years=4>
- Shanmugasundaram, R., Wick, M., & Lilburn, M. S. (2018). Effect of embryonic thermal manipulation on heat shock protein 70 expression and immune system development in pekin duck embryos. *Poultry Science*, 97(12), 4200-4210. <https://doi.org/10.3382/ps/pey298>
- Sparagano, O. A. E., & Ho, J. (2020). Parasitic mite fauna in Asian poultry farming systems. *Frontiers in Veterinary Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00400>

- Srikanth, K., Kumar, H., Park, W., Byun, M., Lim, D., Kemp, S., te Pas, M. F. W., Kim, J. M., & Park, J. E. (2019). Cardiac and skeletal muscle transcriptome response to heat stress in Kenyan chicken ecotypes adapted to low and high altitudes reveal differences in thermal tolerance and stress response. *Frontiers in Genetics, 10*, (Erratum in: *Front. Genet.*, 2020, 11, 197). <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00993>
- Taylor, R. C., Omed, H., & Edwards-Jones, G. (2014). The greenhouse emissions footprint of free-range eggs. *Poultry Science, 93*(1), 231-237. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03489>
- Temim, S., Chagneau, A. M., Guillaumin, S., Michel, J., Peresson, R., & Tesseraud, S. (2000a). Does excess dietary protein improve growth performance and carcass characteristics in heat-exposed chickens? *Poultry Science, 79*(3), 312-317. <https://doi.org/10.1093/ps/79.3.312>
- Temim, S., Chagneau, A., Peresson, R., & Tesseraud, S. (2000b). Chronic heat exposure alters protein turnover of three different skeletal muscles in finishing broiler chickens fed 20 or 25 % protein diets. *The Journal of Nutrition, 130*(4), 813-819. <https://doi.org/10.1093/jn/130.4.813>
- Teteh, A., Lawson, E., Tona, K., Decuyper, E., & Gbéassor, M. (2013). *Moringa Oleifera* leave: hydro-alcoholic extract and effects on growth performance of broilers. *International Journal of Poultry Science, 12*(7), 401-405. <https://doi.org/10.3923/ijps.2013.401.405>
- Thévenot, A., Aubin, J., Tillard, E., & Vayssières, J. (2013). Accounting for farm diversity in Life Cycle Assessment studies – the case of poultry production in a tropical island. *Journal of Cleaner Production, 57*, 280-292. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.027>
- Van de Ven, L. J. F., Van Wagenberg, A. V., Groot Koerkamp, P. W. G., Kemp, B., & Van Den Brand, H. (2009). Effects of a combined hatching and brooding system on hatchability, chick weight, and mortality in broiler. *Poultry Science, 88*(11), 2273-2279. <https://doi.org/10.3382/ps.2009-00112>
- Van Goor, A., Bolek, K. J., Ashwell, C. M., Persia, M. E., Rothschild, M. F., Schmidt, C. J., & Lamont, S. J. (2015). Identification of quantitative trait loci for body temperature, body weight, breast yield, and digestibility in an advanced intercross line of chickens under heat stress. *Genetics Selection Evolution, 47*(1). <https://doi.org/10.1186/s12711-015-0176-7>
- Vitorino Carvalho, A., Hennequet-Antier, C., Crochet, S., Bordeau, T., Couroussé, N., Cailleau-Audouin, E., Chartrin, P., Darras, V. M., Zerjal, T., Collin, A., & Coustham, V. (2020). Embryonic thermal manipulation has short and long-term effects on the development and the physiology of the Japanese quail. *PLoS ONE, 15*(1), e0227700. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227700>
- Vitorino Carvalho, A., Hennequet-Antier, C., Brionne, A., Crochet, S., Jimenez, J., Couroussé, N., Collin, A., & Coustham, V. (2021). Embryonic thermal manipulation impacts the postnatal transcriptome response of heat-challenged Japanese quails. *BMC Genomics, 22*(1). <https://doi.org/10.1186/s12864-021-07832-7>
- Vitorino Carvalho, A., Hennequet-Antier, C., Rouger, R., Delaveau, J., Bordeau, T., Crochet, S., Couroussé, N., Pitel, F., Collin, A., & Coustham, V. (2023). Thermal conditioning of quail embryos has transgenerational and reversible long-term effects. *Journal of Animal Science and Biotechnology, 14*(1). <https://doi.org/10.1186/s40104-023-00924-2>
- Voemesse, K., Teteh, A., Nideou, D., N'nanlé, O., Tété-Benissan, A., Oke, O. E., Gbeassor, M., Decuyper, E., & Tona, K. (2019). Effects of *Moringa oleifera* leave meal in the diet on layer performance, haematological and serum biochemical values. *European Poultry Science, 83*. <https://doi.org/10.1399/eps.2019.263>
- Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., Satoh, Y., Van Vliet, M. T. H., Yillia, P. T., Ringler, C., Burek, P., & Wiberg, D. (2016). Modeling Global water use for the 21st Century: The Water Futures and Solutions (WfAs) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development, 9*(1), 175-222. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016>
- Walugembe, M., Bertolini, F., Dematawewa, C. M. B., Reis, M. P., Elbeltagy, A. R., Schmidt, C. J., Lamont, S. J., & Rothschild, M. F. (2019). Detection of selection signatures among Brazilian, Sri Lankan, and Egyptian chicken populations under different environmental conditions. *Frontiers in Genetics, 9*. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00737>
- Wang, C., Ma, Y., Huang, Y., Su, S., Wang, L., Sun, Y., Wan, Q., Li, H., Zhang, S., Øines, Ø., & Pan, B. (2019). Darkness increases the population growth rate of the poultry red mite *Dermanyssus gallinae*. *Parasites & Vectors, 12*(1). <https://doi.org/10.1186/s13071-019-3456-1>
- Webb, D. R., & King, J. R. (1984). Effects of wetting of insulation of bird and mammal coats. *Journal of Thermal Biology, 9*(3), 189-191. [https://doi.org/10.1016/0306-4565\(84\)90020-2](https://doi.org/10.1016/0306-4565(84)90020-2)
- Wiedemann, S. G., McGahan, E. J., & Murphy, C. M. (2017). Resource use and environmental impacts from Australian chicken meat production. *Journal of Cleaner Production, 140*, 675-684. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.086>
- Wilfart, A., Dusart, L., Méda, B., Ga, A., Espagnol, S., Morin, L., Dronne, Y., Garcia-Launay, F. (2018). Réduire les impacts environnementaux des aliments pour les animaux d'élevage. Dans : R. Baumont (Coord.), *Dossier : Ressources alimentaires pour les animaux d'élevage, INRA Productions Animales, 31*(3), 289-306 <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2018.31.2.2285>
- Williams, A. G., Leinonen, I., & Kyriazakis, I. (2016). Environmental benefits of using turkey litter as a fuel instead of a fertiliser. *Journal of Cleaner Production, 113*, 167-175. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.044>
- Wolc, A., Arango, J., Settar, P., Fulton, J. E., O'Sullivan, N. P., & Dekkers, J. C. M. (2019). Genome wide association study for heat stress induced mortality in a white egg layer line. *Poultry Science, 98*(1), 92-96. <https://doi.org/10.3382/ps/pey403>
- Wolfenson, D., Bachrach, D., Maman, M., Graber, Y., & Rozenboim, I. (2001). Evaporative cooling of ventral regions of the skin in heat-stressed laying hens. *Poultry Science, 80*(7), 958-964. <https://doi.org/10.1093/ps/80.7.958>
- Wu, Q. J., Liu, N., Wu, X., Wang, G. Y., & Lin, L. (2018). Glutamine alleviates heat stress-induced impairment of intestinal morphology, intestinal inflammatory response, and barrier integrity in broilers. *Poultry Science, 97*(8), 2675-2683. <https://doi.org/10.3382/ps/pey123>
- Xu, C., Lv, Z., Shen, Y., Liu, D., Fu, Y., Zhou, L., Liu, W., Chen, K., Ye, H., Xia, X., Xia, J., Wang, Y., Ke, Y., & Shen, J. (2020). Metagenomic insights into differences in environmental resistome profiles between integrated and monoculture aquaculture farms in China. *Environment International, 144*, 106005. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106005>
- Yadav, S., & Jha, R. (2021). Macadamia nut cake as an alternative feedstuff for broilers: Effect on growth performance. *Animal Feed Science and Technology, 275*, 114873. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114873>
- Yahav, S., & McMurtry, J. P. (2001). Thermotolerance acquisition in broiler chickens by temperature conditioning early in life—the effect of timing and ambient temperature. *Poultry Science, 80*(12), 1662-1666. <https://doi.org/10.1093/ps/80.12.1662>
- Yahav, S., Straschnow, A., Luger, D., Shinder, D., Tanny, J., & Cohen, S. (2004). Ventilation, sensible heat loss, broiler energy, and water balance under harsh environmental conditions. *Poultry Science, 83*(2), 253-258. <https://doi.org/10.1093/ps/83.2.253>
- Yalçın, S., Özkan, S., Çabuk, M., Buyse, J., Decuyper, E., & Siegel, P. B. (2005). Pre- and postnatal conditioning induced thermotolerance on body weight, physiological responses and relative asymmetry of broilers originating from young and old breeder flocks. *Poultry Science, 84*(6), 967-976. <https://doi.org/10.1093/ps/84.6.967>
- Zerjal, T., Gourichon, D., Rivet, B., & Bordas, A. (2013). Performance comparison of laying hens segregating for the frizzle gene under thermoneutral and high ambient temperatures. *Poultry Science, 92*(6), 1474-1485. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02840>
- Zhuang, Z. X., Chen, S. E., Chen, C. F., Lin, E. C., & Huang, S. Y. (2019). Genome-wide Association study on the body temperature changes of a broiler-type strain Taiwan Country Chickens under acute heat stress. *Journal of Thermal Biology, 82*, 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.03.007>
- Znanięcka, G. (1967). *Caloric value of protein and fat of the chicken's body*. Proceedings of the 4th Symposium on Energy Metabolism, European Association of Animal Production, K. L. Blaxter & J. Kielanowski (Eds.), pp. 407-408.

Résumé

La viande de volaille et les œufs sont des sources principales de protéines animales pour l'alimentation humaine dans le monde. Leur production a augmenté rapidement au cours des dernières décennies. Cependant, les productions avicoles sont vulnérables au changement climatique, en particulier au réchauffement de la planète et à ses conséquences directes et indirectes. Pour y faire face, il est nécessaire de mettre en place des stratégies d'adaptation des animaux, en particulier en améliorant leur résilience. Ces stratégies nécessitent d'une part de mieux comprendre la physiologie des oiseaux (thermorégulation, efficacité pour la production de viande et d'œufs...) et d'autre part de rechercher des innovations en lien avec la nutrition, la santé, la reprogrammation précoce ou encore la génétique (intégration de nouveaux caractères adaptatifs dans les stratégies de sélection). Il faut également trouver des solutions au niveau des systèmes de production, par exemple en prenant en compte les aires de répartition géographique des maladies liées au changement climatique et en introduisant des pratiques d'atténuation pour réduire les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. Des recherches interdisciplinaires axées sur la génétique, les méthodes techniques (telles que la programmation thermique précoce), les solutions d'ingénierie, des innovations nutritionnelles et de nouvelles stratégies d'élevage agroécologiques sont ainsi développées. Ces stratégies tiennent compte de la demande sociale croissante en faveur de productions animales éthiques dans les perspectives d'une seule santé (« One Health ») et d'un seul bien-être (« One Welfare ») et visent à limiter la concurrence entre l'homme et les animaux pour les ressources alimentaires. Cette revue illustre par quelques exemples les leviers d'amélioration et de stratégies adaptatives envisageables pour rendre les animaux et les systèmes de production avicole plus résilients dans le contexte du changement climatique.

Abstract

What mitigation and adaptation strategies for poultry production in the face of climate change?

Poultry meat and eggs are major sources of animal protein for human consumption worldwide. Their production has increased rapidly in recent decades. However, poultry production is vulnerable to climate change, in particular to global warming and its direct and indirect consequences. To cope with this, it is necessary to implement adaptation strategies at the animal level, in particular by improving the resilience of the animals; these strategies require, on the one hand, a better understanding of the physiology of the birds (thermoregulation, efficiency for meat and egg production, etc.) and, on the other hand, the search for innovations in relation to nutrition, health, early reprogramming or genetics (integration of new adaptive traits in selection strategies). Solutions also need to be found at the production systems level to take into account the changes in the geographical distribution of diseases linked to climate change and to introduce mitigation practices to reduce energy consumption and greenhouse gas emissions. Interdisciplinary research focusing on genetics, technical methods (such as early thermal programming), engineering solutions, nutritional innovations and new breeding strategies is being developed. These strategies consider the growing social demand for ethical animal production in the perspectives of the "One Health" and "One Welfare" concepts and limit the feed-food competition in the context of climate change. This review illustrates through a few examples the levers of improvement and combined adaptive strategies that can be considered to make poultry production systems more resilient in the context of climate change.

COLLIN, A., COUSTHAM, V., TONA, J. K., TESSERAUD, S., MIGNON-GRASTEAU, S., MÉDA, B., VITORINO CARVALHO, A., GUYOT, Y., LAGARRIGUE, S., PITEL, F., & ZERJAL, T. (2024). Face au changement climatique, quelles stratégies d'atténuation et d'adaptation pour les productions avicoles ? *INRAE Productions Animales*, 37(1), 8069.

<https://doi.org/10.20870/productions-animales.2024.37.1.8069>



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

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

La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, les pages et le DOI en respectant les informations figurant ci-dessus.