



HAL
open science

Impact de l'introduction en sélection de nouveaux critères d'efficacité alimentaire sur la durabilité de la production du poulet de chair

Quentin Berger

► **To cite this version:**

Quentin Berger. Impact de l'introduction en sélection de nouveaux critères d'efficacité alimentaire sur la durabilité de la production du poulet de chair. Biologie animale. Université François Rabelais - Tours, 2022. Français. NNT: . tel-03651282

HAL Id: tel-03651282

<https://hal.inrae.fr/tel-03651282v1>

Submitted on 25 Apr 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

UNIVERSITÉ DE TOURS

ÉCOLE DOCTORALE : SSBCV
ÉQUIPE Adaptation, Qualité et Sélection

THÈSE

 présentée par :

Quentin BERGER

soutenue le : 19 janvier 2022

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Tours**

Discipline/ Spécialité : Sciences de la vie

IMPACT DE L'INTRODUCTION EN SELECTION DE NOUVEAUX CRITERES D'EFFICACITE ALIMENTAIRE SUR LA DURABILITE DE LA PRODUCTION DU POULET DE CHAIR

THÈSE dirigée par :

Mme MIGNON-GRASTEAU Sandrine
Mme LE BIHAN-DUVAL Elisabeth

Directrice de Recherches (HDR), INRAE de Nouzilly
Directrice de Recherches (HDR), INRAE de Nouzilly

RAPPORTEURS :

Mme DUPONT-NIVET Mathilde
Mme GILBERT Hélène

Directrice de Recherches (HDR), INRAE de Jouy en Josas
Directrice de Recherches (HDR), INRAE de Toulouse

PRESIDENT du JURY

Mme SAINT-DIZIER Marie

Professeur, Université de Tours

JURY :

Mme DUPONT-NIVET Mathilde
Mme GILBERT Hélène
Mme LE BIHAN-DUVAL Elisabeth
Mme MIGNON-GRASTEAU Sandrine
Mme SAINT-DIZIER Marie
Mr SOURDIOUX Michel
Mme ZERJAL Tatiana

Directrice de Recherches (HDR), INRAE de Jouy en Josas
Directrice de Recherches (HDR), INRAE de Toulouse
Directrice de Recherches (HDR), INRAE de Nouzilly
Directrice de Recherches (HDR), INRAE de Nouzilly
Professeur, Université de Tours
Directeur du SYSAAF (PHD), INRAE de Nouzilly
Chargée de Recherches, INRAE de Jouy en Josas

Résumé

A l'heure actuelle, la durabilité de la production avicole est questionnée pour son impact environnemental, sa compétition avec l'alimentation humaine dans l'utilisation des terres arables et des céréales, et la dépendance aux importations qu'elle génère. Des marges de progrès existent via l'amélioration de l'efficacité globale du système, grâce à la recherche d'animaux efficaces sur la base de régimes moins riches en maïs et en soja et utilisant davantage de matières premières locales et peu valorisables en nutrition humaine. L'objectif de la thèse était donc de revisiter la sélection de l'efficacité alimentaire du poulet de chair dans ce contexte d'évolution des régimes alimentaires des volailles. Les travaux ont bénéficié des possibilités offertes par le développement d'un automate de phénotypage à haut-débit de la consommation alimentaire et du poids vif des animaux, rendant accessibles les cinétiques d'efficacité alimentaire en conditions de production du poulet de chair (au sol et en groupe).

Une première étude a permis d'évaluer l'impact d'un régime alternatif sur les performances d'animaux à croissance lente ou à croissance rapide, deux types génétiques largement utilisés dans les élevages avicoles français. Si les performances moyennes des animaux nourris avec le régime alternatif ne diffèrent que faiblement de celles d'animaux nourris avec le régime classique, la variabilité des performances apparaît plus faible avec le régime alternatif tout au long de la période d'élevage. L'étude des données quotidiennes et de leurs corrélations phénotypiques avec les performances à l'abattage a montré l'importance des périodes de transition alimentaire dans les performances même si la capacité d'adaptation des animaux aux régimes alternatifs reste très bonne. C'est ce cadre d'utilisation de matières premières alternatives qui a donc été retenu pour la suite des travaux.

La seconde partie de la thèse s'est portée sur l'étude du déterminisme génétique de l'efficacité alimentaire évaluée sur la base de données journalières acquises sur 640 animaux pedigree. Ils étaient issus de deux lignées expérimentales à croissance rapide sélectionnées de manière divergente sur le pH ultime du filet, un critère déterminant pour la qualité technologique et sensorielle de la viande. D'importantes différences ont été mises en évidence entre les deux lignées, avec des niveaux d'héritabilité du poids vif et de l'indice de consommation plus élevés pour la lignée à faible pH (pHu-), une persistance plus longue des effets maternels sur le poids des animaux à pH élevé (pHu+), des corrélations génétiques de signe opposé entre le pHu (le critère de sélection) et les autres caractères dans les deux lignées. Les possibilités et modalités de sélection de l'efficacité alimentaire sont donc propres à chaque lignée.

La dernière partie de la thèse a permis de simuler différents scénarios de sélection pour évaluer l'intérêt de stratégies plutôt classiques, comme la sélection sur l'indice de

consommation à l'âge d'abattage ou plus originales, comme la sélection sur l'indice à un âge plus précoce (17, 26 ou 30 jours) ou sur le profil d'évolution de l'efficacité sur la période d'élevage. La sélection sur l'efficacité à un âge très précoce montre une réponse moindre par rapport aux autres stratégies. Utiliser les profils d'évolution de l'indice de consommation semble pertinent dans la lignée pHu+, alors que l'indice de consommation à 30 jours est le meilleur scénario dans la lignée pHu-. L'amélioration de l'indice passerait plutôt par une plus faible consommation alimentaire chez les pHu+ et par un poids plus élevé chez les pHu-. Ces stratégies permettraient d'améliorer la croissance des animaux sans modifier leur conformation et apporteraient un gain économique de 2 à 10% selon les lignées. Un travail d'intégration a également été réalisé pour évaluer les gains environnementaux d'une telle sélection, qui semblent importants.

Mots-clés : poulet, efficacité alimentaire, durabilité, génétique, sélection

Abstract

Currently, the sustainability of poultry production is questioned for its environmental impact, its competition with human food in the use of arable land and cereals, and the dependence on imports that it generates. Margins of progress exist through the improvement of the global efficiency of the system, thanks to the search for efficient animals based on diets less rich in corn and soy and using more local raw materials that are not very valuable for human nutrition. The objective of the thesis was therefore to revisit the selection of broiler feed efficiency in this context of changing poultry diets. The work benefited from the possibilities offered by the development of a high-throughput phenotyping system for feed consumption and live weight of animals, making feed efficiency kinetics accessible under broiler production conditions (on the ground and in groups).

A first study evaluated the impact of an alternative diet on the performance of slow-growing and fast-growing animals, two genetic types widely used in French poultry farms. While the average performance of animals fed the alternative diet differed only slightly from that of animals fed the conventional diet, the variability of performance appeared lower with the alternative diet throughout the rearing period. The study of daily data and their phenotypic correlations with performance at slaughter showed the importance of dietary transition periods in performance even though the adaptability of animals to alternative diets remains very good. It is this framework of use of alternative raw materials that was thus retained for the continuation of the work.

The second part of the thesis focused on the study of the genetic determinism of feed efficiency evaluated on the basis of daily data acquired on 640 pedigree animals. They were derived from two fast-growing experimental lines selected in a divergent way on the ultimate pH of the fillet, a criterion determining the technological and sensory quality of the meat. Important differences were found between the two lines, with higher levels of heritability of live weight and feed conversion for the low pH line (pHu-), longer persistence of maternal effects on weight in high pH animals (pHu+), genetic correlations of opposite sign between pHu (the selection criterion) and other traits in both lines. The possibilities and modalities of selection for feed efficiency are therefore specific to each line.

In the last part of the thesis, different selection scenarios were simulated to evaluate the interest of rather classical strategies, such as selection on feed efficiency at slaughter age, or more original ones, such as selection on feed efficiency at an earlier age (17, 26 or 30 days) or on the evolution profile of feed efficiency over the breeding period. Selection on efficiency at a very early age shows a lower response compared to the other strategies. Using feed conversion profiles seems relevant in the pHu+ line, while feed conversion at 30 days is the best scenario

in the pHu- line. The improvement of the index would rather be achieved by a lower feed intake in pHu+ and by a higher weight in pHu-. These strategies would improve the growth of the animals without modifying their conformation and would bring an economic gain of 2 to 10% depending on the lines. An integration work was also carried out to evaluate the environmental gains of such a selection, which seem important.

Keywords: chicken, feed efficiency, sustainability, genetics, selection

Remerciements

Mené à bien en un peu plus de trois ans, ce travail de thèse aura impliqué de nombreuses personnes qu'il est dorénavant temps de remercier. Je tiens tout d'abord à remercier, en priorité :

Mes directrices de thèse, **Sandrine Mignon-Grasteau** et **Elisabeth Le Bihan-Duval**, pour m'avoir fait confiance pour mener à bien ce travail de thèse. Je les remercie plus particulièrement pour leur gentillesse, leur disponibilité, leurs nombreux conseils et les multiples relectures de mes différents travaux réalisés sur ces trois années. Je n'ose penser à ce qu'aurait été ce travail sans tout cela. Je leur suis donc éternellement reconnaissant.

Cecile Berri, directrice de l'UMR Biologie des Oiseaux et Aviculture de Nouzilly, de m'avoir accueilli dans son laboratoire pour effectuer ma thèse financée par le département de Génétique Animale à INRAE et la région Centre Val-de-Loire.

Marie Saint-Dizier, **Hélène Gilbert**, **Mathilde Dupont-Nivet**, **Tatiana Zerjal** et **Michel Sourdioux**, les rapporteuses et membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse.

Les membres de mon comité de thèse, **Ludovic Brossard**, **Ingrid David**, **Catherine Larzul**, **Agnès Narcy** et **Tatiana Zerjal**, pour leurs remarques et questions qui ont permis de raffiner ce travail de thèse.

Les membres de l'équipe AQSel qui ont toutes et tous été bienveillants à mon égard, **Jacky Ezagal**, **Elodie Guettier**, **Christelle-Hennequet-Antier**, **Amélie Juanchich**, **Emilie Raynaud** et **Séverine Urvoix**. Je pourrais expliquer ce que je pense de chacun et chacune mais cela serait vite répétitif. Alors à vous tous merci de m'avoir aidé et soutenu pour ces trois années.

Toutes les personnes qui ont répondu présent lors de mes découpes et abattages et notamment **Elisabeth Baéza**, **Thierry Bordeau**, **Estelle Cailleau-Audouin**, **Pascal Chartrin**, **Anne Collin**, **Nathalie Couroussé**, **Vincent Coustham**, **Sabine Crochet**, **Estelle Godet**, **Laurence Guilloteau**, **Sonia Métayer-Coustard**, **Sophie Tesseraud**, **Amandine Mika**, **Christophe Souchet**...

L'unité expérimentale PEAT et particulièrement **Patrice Ganier**, **Marine Chahnamian**, **Olivier Callut** et **Jérémy Bernard** pour leur aide dans l'élevage des animaux et dans l'utilisation de l'automate de consommation.

Bertrand Méda pour les pistes qu'il a pu m'apporter sur l'impact des régimes alternatifs dur l'environnement.

Les personnes qui sont passées dans l'équipe, **Karine Tropchaud**, **Nina Kruger**, **Léane Mabile**, **Célia Mouty** ...

L'ancienne détentrice de mon bureau, **Eva Pampouille**, qui a accepté de partager ce dernier avec moi.

Je pense que personne n'a été oublié et si c'est le cas sachez que je remercie tous ceux qui m'ont accompagné de près ou de loin pour ce travail de thèse.

Finalement je tiens à remercier mes amis, et particulièrement **Angélique** et **Sandra** sans qui le stress de cette thèse aurait fini par me ronger, et ma famille d'avoir cru en moi et de m'avoir poussé toujours plus loin même pendant les périodes de remise en question.

Table des matières

Résumé.....	3
Abstract	5
Remerciements	7
Table des matières	9
Abréviations	12
Liste des figures.....	14
Liste des tableaux.....	16
Liste des annexes.....	17
Introduction générale.....	18
<i>CHAPITRE 1 : Etude bibliographique de l'impact de la composition des régimes avicoles sur les performances</i>	22
1. Impact environnemental de la composition des régimes avicoles	22
2. Impact sur les performances de la composition des régimes avicoles	25
2.1. Description de la base de données	25
2.1.1. Constitution de la base de données.....	25
2.1.2. Caractéristiques du régime prises en compte.....	26
2.1.3. Autres critères enregistrés : conditions d'élevage, génotype, âge	27
2.1.4. Caractères enregistrés.....	27
2.2. Analyses statistiques	28
2.3. Résultats	29
2.3.1. Effet sur l'efficacité alimentaire	32
2.3.1.1. Effet de l'environnement et du type d'animal	32
2.3.1.2. Effet du taux et de la source de protéines dans la ration	34
2.3.1.3. Effet du taux et de la source de matière première énergétique	35
2.3.2. Effet sur la consommation alimentaire	36
2.3.2.1. Effet de l'environnement et du type d'animaux	36
2.3.2.2. Effet de la source d'énergie dans la ration.....	40
2.3.3. Effets sur le poids vif et la vitesse de croissance.....	41
2.3.3.1. Effet du type d'animal	41

2.3.3.2. Effet de la composition du régime	45
2.4. Discussion	48
2.4.1. Intérêts et limites de la méta-analyse.....	48
2.4.2. Effet de l'environnement de mesure des performances	49
2.4.3. Effet de la composition du régime	49
Conclusion	51
CHAPITRE 2 : Les automates de phénotypage de la consommation alimentaire des volailles	52
1. Du groupe à l'individu	53
1.1. Les premiers automates en volaille.....	53
1.2. Le problème de l'individualisation des données	55
1.3. Age et fréquence de mesure des animaux.....	56
2. De l'intérêt des automates de phénotypage de la consommation.....	56
2.1. Facilitation de l'étude du comportement alimentaire	56
2.2. Gestion de lot plus précise	58
3. Déterminisme génétique des caractères de comportement et d'efficacité alimentaire.....	59
Conclusion	60
CHAPITRE 3 : Impact d'un régime alternatif au maïs-soja sur les performances de poulets à croissance lente ou rapide	61
CHAPITRE 4 : Déterminisme génétique des caractères de croissance, de consommation et d'efficacité alimentaire quotidiens chez le poulet de chair nourri avec un aliment alternatif.....	95
CHAPITRE 5 : Evaluation de différentes stratégies de sélection de l'efficacité alimentaire du poulet de chair dans un contexte alimentaire alternatif au modèle maïs-soja	119
CHAPITRE 6 : Discussion générale	141
1. Importance des périodes de transitions alimentaires.....	142
2. Amélioration de l'efficacité alimentaire en contexte alternatif.....	143
2.1. Régime alternatif	143
2.1.1. Impact sur le coût de production	143
2.1.2. Impact environnemental	145
2.1.3. Impact sur le volet social du développement durable	147
2.2. Nouvelles stratégies de sélection.....	148
2.2.1. Impact sur le coût de production	148
2.2.2. Impact environnemental	150

2.2.3. Impact sur le volet social de la durabilité.....	151
3. Perspectives d'utilisation de l'automate.....	152
3.1. Sélection des animaux labels.....	152
3.2. Une sélection encore plus précise des animaux	152
Conclusion générale	154
Références.....	156
Annexes	181
Annexe 1 : Liste des publications	181
Publications	181
Communications.....	182
Annexe 2 : Poster présenté au Congrès ESPG (Prague) du 23 au 25 octobre 2019.....	183
Annexe 3 : Article de Guettier et al. sur les caractéristiques techniques de la mangeoire BIRD-e	184
Annexe 4 : Tables supplémentaires de l'article "The kinetics of growth, feed intake and feed efficiency reveal good capacity of adaptation of slow- and rapid-growing broilers to alternative diets"	201
Annexe 5 : Tables supplémentaires de l'article "Profiles of genetic parameters of body weight and feed efficiency in two divergent broiler lines for meat ultimate pH"	257

Abréviations

AD, CD	Régime alternatif, à base de matières premières alternatives et régime « classique » à base de maïs et de soja
ADG, GP	Gain moyen quotidien
AFY	Pourcentage de gras abdominal
AGE_DEB, AGE_MED, AGE_FIN	Age au début, au milieu, à la fin de la période étudiée
AGE_PV	Age de mesure du poids
BMV, PMY, PmY	Pourcentage de filet, pourcentage de <i>Pectoralis major</i> , pourcentage de <i>Pectoralis minor</i>
BW (PV), BWX	Poids vif, poids vif à X jours
CC, AC, EU, CEDNR, LO, PD	Changement climatique, acidification, eutrophisation, demande en énergie non renouvelable, occupation des sols, demande en phosphore
CFCR, CFCRX, CFCRf	Indice de consommation cumulé, indice de consommation cumulé à X jours, indice de consommation cumulé à l'abattage
CLUST_NUM	Numéro du profil d'efficacité alimentaire cumulée
CONS	Consommation alimentaire
CP	Pourcentage de protéines dans la ration
CV	Coefficient de variation
DCFCRX	Indice de consommation alimentaire cumulé à X jours
DDGS	Dried Distillers Grains with Solubles
DEB_REG, FIN_REG	Début et fin de la période de distribution du régime
DFCR	Indice de consommation quotidien
DFI	Consommation alimentaire quotidienne
DUREE	Durée de la période étudiée
EMAn	Energie métabolisable corrigée pour un bilan azoté nul
ENVT	Environnement d'élevage
FAST, MID, SLOW	Animal avec une vitesse de croissance élevée, moyenne ou lente
FCR, IC	Indice de consommation
FE	Efficacité alimentaire
FW	Poids d'aliment
L*, a*, b*	Luminosité, indice de rouge, indice de jaune
LR, STD	Poulets de type Label Rouge, Standard

P_BLE, P_COLZ, P_DREC,
P_FEVE, P_LUPN, P_MAIS,
P_ORGE, P_POIS, P_SOJA,
P_SORG, P_TOUR

pHu

pHu+, pHu-

RFID

RRM

TYPE

TY

Proportion de blé, tourteau de colza, drèches, féverolle, lupin,
maïs, orge, pois, tourteau de soja, sorgho, tourteau de
tournesol

pH ultime du filet, 24h après ressuage

Lignée à fort ou faible pHu

Identification par fréquence radio

Modèle de régression aléatoire

Type d'animal

Pourcentage de cuisse

Liste des figures

Figure 1.1. Les différents postes d'impact environnemental de la production de poulet de chair standard et label Rouge.	23
Figure 1.2. Effet du type de l'animal sur l'indice de consommation	32
Figure 1.3. Effet d'interaction entre type d'animal et taux protéique de la ration sur l'indice de consommation	33
Figure 1.4. Effet d'interaction entre environnement et type d'animal sur l'indice de consommation	34
Figure 1.5. Effet de l'interaction entre type d'élevage et taux protéique de la ration	34
Figure 1.6. Effet de la matière première sur l'indice de consommation	35
Figure 1.7. Effet du type d'animal sur la consommation	37
Figure 1.8. Interaction entre le type d'animal et le taux protéique dans la ration sur la consommation	37
Figure 1.9. Effet d'interaction entre environnement et type d'animal sur l'indice de consommation	38
Figure 1.10. Interaction entre le type d'animal et le taux de blé (a) ou de maïs (b) dans la ration.....	39
Figure 1.11. Effet de l'environnement et du taux maïs dans la ration	40
Figure 1.12. Effet de la source énergétique sur la consommation alimentaire des poulets.....	40
Figure 1.13. Effet du type d'animaux sur le poids vif (a) et le gain de poids (b)	42
Figure 1.14. Interaction entre le type d'animal et le taux protéique ou le pourcentage de soja sur le gain de poids.....	43
Figure 1.15. Interaction entre le type d'animal et le taux de blé dans la ration sur le poids vif (a) et le gain de poids (b).....	44
Figure 1.16. Interaction entre le taux protéique et le pourcentage de soja (a) ou de tournesol (b)	45
Figure 1.17. Effet du taux de blé sur le GP	46
Figure 1.18. Interaction entre le taux protéique et le pourcentage de blé sur le gain de poids	47
Figure 1.19. Interaction entre le pourcentage de blé et de tournesol dans la ration	47
Figure 2.1. Distribution des intervalles entre visites pour 4 génotypes de poulets de chair (Howie et al., 2009).....	58
Figure 3.1. Corrélations phénotypiques entre jours successifs pour les différentes performances des animaux pHu- (a) et pHu+ (b).....	63
Figure 3.2. Modélisation de l'indice de consommation cumulé des animaux de la seconde étude (chapitres 4 et 5)	64

Figure 3.3. Variabilité de l'indice de consommation quotidien (FCR) en fonction du mode de calcul.	65
Figure 3.4. Kinetics of the mean and of the coefficient of variation for BW (4a for LR; 4b for STD) and ADG (4c for LR; 4d for STD) for chickens fed with classical diet or alternative diet.	77
Figure 3.5. Kinetics of the mean and of the coefficient of variation for DFI (2a for LR; 2b for STD) and DFCR (2c for LR; 2d for STD) for chickens fed with classical diet or alternative diet	79
Figure 3.6. Kinetics of the mean and of the coefficient of variation for DCFCR (3.4.a for LR; 3.4.b for STD) for chickens fed with classical diet or alternative diet	82
Figure 3.7. Profiles of correlations for LR (a: AD, b: CD) and STD (c: AD, d: CD) chickens between DFI and traits measured at slaughter.	85
Figure 3.8. Profiles of correlations for LR (a: AD, b: CD) and STD (c: AD, d: CD) chickens between BW and traits measured at slaughter.	86
Figure 3.9. Profiles of correlations for LR (a: AD, b: CD) and STD (c: AD, d: CD) chickens between DCFCR and traits measured at slaughter.	87
Figure 4.1. Evolution du pH ultime au sein des deux lignées divergentes de poulet.	96
Figure 4.2. Kinetics of BW (2a), ADG (2b), DFI (2c), and DCFCR (2d) in both chicken lines.	100
Figure 4.3. Heritability estimates (+ 1 standard error) of (3.a) BW, (3.b) ADG, (3.c) DFI, and (3.d) DCFCR.	102
Figure 4.4. Maternal permanent environment effect (c^2) on (4.a) BW, (4.b) ADG, (4.c) DFI, and (4.4d) DCFCR.	104
Figure 4.5. Kinetics of genetic correlations between (DCFCR ₄₂) and daily performance for pHu+ (5.4.a) and pHu- (5.4.b).	106
Figure 4.6. Kinetics of genetic correlations between pHu and daily performance for pHu+ (4.6.a) and pHu- (4.6.b).	107
Figure 4.7. Kinetics of genetic correlations between BMY and the DCFCR for both lines. .	108
Figure 5.1. Profil d'efficacité de différents animaux présentant le même DCFCF ₄₂	120
Figure 5.2. Clusters of DCFCR for the pHu- lines (a) and pHu+ line (b).	129
Figure 5.3. Slaughter performances of the different clusters studied DCFCR ₄₂ (a, b) BW ₄₂ (c, d) and BMY (e, f) in pHu+ line (full bars) and pHu- lines (dashed bars).	131
Figure 5.4. Response to selection of DCFCR ₄₂ , BW ₄₂ , DFI, BMY and pHu in pHu+ (a) and pHu- (b) lines, depending of selected trait	135
Figure 6.1. Liens entre efficacité alimentaire et durabilité.	141
Figure 6.2. Différence d'impact environnemental du régime alternatif par rapport au régime classique (en % des impacts du régime classique) en production label rouge ou standard. ..	147
Figure 6.3. Cinétique d'ingestion d'animaux à forte et à faible consommation journalière. .	153

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Caractéristiques de la normalité des résidus pour les différents caractères étudiés avant et après transformation.	28
Tableau 1.2. Significativité des effets directs et interactions sur les performances des animaux.	30
Tableau 1.3. Equations des modèles retenus pour chaque variable.	31
Tableau 2.1. Caractéristiques des automates de phénotypage de la consommation alimentaire des volailles.	54
Table 3.1. Composition and age of distribution of classical (CD) and alternative (AD) diets for Cobb 500 (STD) and Label Rouge (LR) genotypes	69
Table 3.2. Diet and period effects on body weight (BW), average daily gain (ADG), feed intake (DFI), feed efficiency (DFCR) and cumulated feed efficiency (DCFCR).	75
Table 3.3. Diet and period effects on the coefficient of variation of body weight (BW), average daily gain (ADG), feed intake (DFI), feed efficiency (DFCR) and cumulated feed efficiency (DCFCR) for each chicken genotype.	80
Table 3.4. Body composition and meat characteristics of label rouge (LR) and Cobb500 (STD) genotypes fed with either the alternative diet or the classical diet.	83
Table 4.1. Body composition and meat characteristics of label rouge (LR) and Cobb500 (STD) genotypes fed with either the alternative diet or the classical diet.	105
Table 4.2. Composition and age of distribution of diets.	112
Table 5.1. Composition and age of distribution of diets.	124
Table 5.2. Feed efficiency clusters characteristics of the two pHu lines.	128
Table 5.3. Heritability (diagonal) and genetic correlations (upper right triangle) estimates for the different traits of feed efficiency, body weight, breast yield and breast meat pH in pHu-lines.	133
Tableau 6.1. Composition des différents régimes classiques (CD) et alternatifs (AD) pour des animaux à croissance rapide (STD) et à croissance lente (LR) utilisés au cours de nos études	144
Tableau 6.2. Prix des matières premières utilisées (€/t).	145
Tableau 6.3. Coût des aliments classique (CD) et alternatif (AD) en €/tonne, en production label rouge (LR) ou standard (STD).	145
Tableau 6.4. Impact environnemental par kg de poids vif des régimes alternatif (AD) et classique (CD) utilisés pour les souches Label Rouge (LR) et standard (STD).	146
Tableau 6.5. Impact environnemental des différentes stratégies de sélection envisagées (par kg de poids vif).	150
Tableau 6.6. Comportement alimentaire et performances d'animaux pHu+ de 17 jours étudiés pour la journée du 20/12/2019.	153

Liste des annexes

Annexes	181
Annexe 1 : Liste des publications.....	181
Publications.....	181
Communications	182
Annexe 2 : Poster présenté au Congrès ESPG (Prague) du 23 au 25 octobre 2019.....	183
Annexe 3 : Article de Guettier et al. sur les caractéristiques techniques de la mangeoire BIRD-e.....	184
Annexe 4 : Tables supplémentaires de l'article « The kinetics of growth, feed intake and feed efficiency reveal good capacity of adaptation of slow- and rapid-growing broilers to alternative diets”	201
Annexe 5 : Tables supplémentaires de l'article “Profiles of genetic parameters of body weight and feed efficiency in two divergent broiler lines for meat ultimate pH”	257

Introduction générale

Alors que la volaille a été domestiquée il y a environ 9500 ans (Wang et al., 2020), l'industrie avicole n'existe que depuis un siècle environ. Les volailles ont longtemps été élevées pour la production d'œufs, la viande n'étant souvent considérée que comme un sous-produit des œufs (Siegel, 2014). Initiée en 1945 aux USA, la recherche d'un poulet de chair satisfaisant aux attentes culinaires des consommateurs et à un prix abordable a posé les bases des futurs schémas de sélection et de production d'animaux hybrides, aujourd'hui diffusés partout dans le monde. Les premiers objectifs de sélection ont été de rendre cette production exempte de problèmes liés aux carences alimentaires (rachitisme, pérose et malformation des pattes) (Gordy et al., 1974) et de maladies comme la maladie de Marek (Schat, 2016) et la coccidiose (Grumbles et al., 1948). En parallèle, la mise en œuvre d'une sélection massale et l'amélioration des régimes à base de maïs et soja ont été utilisées pour accélérer la croissance des animaux. Jusqu'à l'introduction de méthodes simples de mesures de l'énergie métabolisable en 1970, le gain de croissance a entraîné une augmentation de la quantité d'aliment ingérée par animal, car les régimes ne satisfaisaient pas toujours les besoins alimentaires des animaux (Sibbald, 1976). Du côté génétique, des recherches ont été menées démontrant que l'efficacité alimentaire, ratio du gain de poids sur la consommation alimentaire, était un caractère héritable et que sa sélection pourrait permettre d'améliorer encore la croissance des animaux ou de garder une croissance identique tout en limitant la quantité d'aliment consommée (Wilson, 1969 ; Guill et Washburn, 1974 ; Pym et Nicholls, 1979). La prise en compte en sélection de l'efficacité alimentaire, en plus de la croissance, a conduit dans les années 90 à des animaux un tiers plus efficaces et quatre fois plus lourds à 42 jours que les animaux de 1957 (indice de consommation de 2.0 vs 3.0 et poids vif de 2132 g vs 507 g, respectivement, Havenstein et al., 1994a). En réponse à une demande croissante en produits découpés et élaborés, qui représentent aujourd'hui de l'ordre de 80% de la consommation du poulet en France et 90% aux USA (Zuidhof et al., 2014 ; ITAVI, 2019), la sélection s'est également concentrée sur l'augmentation de la proportion du filet qui représente actuellement plus de 20% du poids vif (Pettracci et al., 2015). Conséquence de la sélection sur la croissance, l'efficacité alimentaire et le rendement en filet, l'indice de conversion en filet (quantité d'aliment par gramme de filet) a drastiquement diminué entre des souches de 1957 (28.2 g/g), 1978 (17.0 g/g) et 2005 (9.4 g/g, Zuidhof et al., 2014). En 50 ans, l'industrie du poulet de chair a ainsi pu réduire de 50% la quantité d'aliment par kilogramme de poids vif produit et par 67% la quantité d'aliment par kilogramme de filet produit (Zuidhof et al., 2014). L'aliment représentant environ 60% du coût de production du poulet (Chenut, 2017), des gains économiques substantiels ont donc été obtenus, contribuant en grande part au succès de la volaille. Les gains d'efficacité alimentaire ont également permis de réduire l'impact environnemental du poulet de chair standard, plus faible que celui des autres filières de type

Label Rouge ou biologique utilisant des génétiques alternatives à croissance lente et moins efficaces (Malher et al., 2018).

Si les piliers économique et environnemental du développement durable ont bénéficié des progrès apportés par la sélection, le bien-être et la santé des animaux ont en revanche été négativement impactés. Ainsi les souches les plus efficaces sont plus sensibles aux troubles métaboliques et musculo-squelettiques (Havenstein et al., 1994b ; Petracci et al., 2015). Des changements de posture et une dégradation de la qualité de la marche ont également été entraînés par l'amélioration des performances de croissance et le développement du filet (Baéza et al., 2012 ; Zuidhof et al., 2014). L'activité physique des animaux efficaces est également réduite par rapport aux animaux moins efficaces (Tallentire et al., 2016). Les objectifs de sélection sont ainsi questionnés et doivent être revisités au prisme de l'ensemble des enjeux du développement durable. En ce qui concerne l'efficacité alimentaire, si elle demeure un élément essentiel de la sélection des poulets de chair, son amélioration doit se faire dans le cadre d'une évolution des régimes, afin que les animaux soient capables de valoriser au mieux des régimes alimentaires durables. De plus, des questions se posent sur les conditions de mesure de l'efficacité alimentaire, dont la mesure traditionnelle en cage pose des problèmes de biais de mesure et de bien-être animal.

En effet, la mesure de l'efficacité alimentaire implique de mesurer l'ingestion des animaux, ce qui se faisait traditionnellement en plaçant les animaux en cage afin d'obtenir des données individuelles (Simsek et al., 2014). Il a été montré qu'en plus de présenter des performances différentes de celles d'animaux élevés au sol (Simsek et al., 2014 ; Wang et al., 2021), les animaux élevés en cage ne peuvent exprimer pleinement leurs comportements. C'est le cas en particulier pour l'activité physique et le comportement social, ce qui pénalise le bien-être des animaux élevés en cage (Ohzan et al., 2016) et biaise les données d'efficacité obtenues, en supprimant un poste important de dépense énergétique. En réponse, différents automates ont été mis au point afin d'accéder aux mesures individuelles de la consommation alimentaire pour des animaux élevés au sol et en groupe. Pour faciliter la mesure, certains automates ont été conçus pour isoler l'animal de ses congénères au moment de la prise alimentaire et s'assurer de son identité (Bley and Bessei, 2008 ; Howie et al., 2009 ; Tu et al., 2011 ; Basso et al., 2014 ; Wen et al., 2018 ; Yan et al., 2019). Il existe dans ce cas un impact sur le comportement alimentaire (Li et al., 2021). Certains prototypes ne permettent pas non plus l'obtention de mesures précises de l'ingéré alimentaire à un âge précoce (Wen et al., 2018). Un prototype récemment développé à INRAE, la mangeoire BIRD-e, a permis de lever ces limites mais aussi d'avoir accès à la mesure individuelle du poids de l'animal et donc à l'indice de consommation journalier, offrant de nouvelles possibilités pour l'analyse génétique de l'efficacité et du comportement alimentaire chez le poulet (Guettier et al., 2020 ; Mika et al., 2021).

Au-delà des conditions de mesure de l'efficacité alimentaire, les conditions nutritionnelles à appliquer en sélection doivent permettre de prendre en compte les enjeux environnementaux et sociaux d'une production de poulet de chair durable. Classiquement les régimes contiennent de fortes proportions de maïs et de blé comme sources énergétiques et de soja comme source protéique. En Europe, le soja provient majoritairement d'importations depuis le continent américain, avec 14 millions de tonnes importées en 2018 (European Commission, 2019). Il est utilisé au détriment de matières protéiques locales et sa culture contribue à la déforestation de la forêt amazonienne au Brésil (Lathuillière et al., 2017). L'utilisation de céréales en forte proportion dans les régimes avicoles entre quant à elle en compétition avec l'alimentation humaine, directement au travers de l'utilisation de la matière première, et indirectement via l'utilisation des terres agricoles (Steinfeld et al., 2006 ; Mottet et Tempio, 2017). Concernant la culture conventionnelle du maïs dans les principales régions de production française, elle demande un recours important à l'irrigation, la rendant coûteuse en eau (de 1000 à 3000 m³/ha/an) et en énergie (Giuliano et al., 2016). L'utilisation de maïs, blé et soja produits localement et par des méthodes alternatives (faibles intrants, rotations de cultures, conservation du sol) avec des rendements proches de la culture conventionnelle permet de réduire l'impact environnemental des régimes alimentaires avicoles (Giuliano et al., 2016). Pour aller plus loin, la diminution de la part de soja, maïs et blé dans la ration doit également être envisagée. Plusieurs types de ressources alternatives existent, telles que des sous-produits des cultures (son, drèches, ...), de plus en plus disponibles avec le développement des biocarburants (Swiatkiewicz et Koreleski, 2008), ou les oléo-protéagineux produits en Europe (pois, féveroles, tournesol, colza). Des études ont montré que de tels régimes pourraient avoir un impact bénéfique sur les émissions de gaz à effets de serre (Leinonen et al., 2013 ; Tallentire et al., 2018).

Les objectifs de ma thèse étaient donc de revisiter les méthodes de sélection de l'efficacité alimentaire grâce aux nouveaux outils de phénotypage à haut-débit et d'évaluer les possibilités d'amélioration génétique de ce caractère dans un contexte de valorisation de régimes alternatifs et d'évaluation multicritères. Une revue bibliographique des effets de la génétique et de l'utilisation de matières premières alternatives sur l'efficacité alimentaire chez le poulet de chair est présentée en première partie du manuscrit afin de définir le champ des possibles. Si de nombreuses études s'intéressent aux performances des animaux nourris avec des matières premières alternatives, les résultats de ces études sont souvent contradictoires et les facteurs de variation (génotype, composition des régimes, âge et durée de distribution des régimes ...) multiples. Afin d'avoir une vision plus synthétique, une méta-analyse a donc été réalisée pour évaluer l'impact sur les performances du poulet de chair du remplacement des trois matières premières principales des régimes avicoles (blé, maïs, soja) par des matières premières alternatives.

Suite à cette analyse bibliographique, la partie expérimentale a visé à explorer le déterminisme génétique de l'efficacité alimentaire des poulets de chair nourris avec des aliments alternatifs, en s'appuyant sur les nouvelles possibilités de phénotypage de la consommation et du poids de l'animal offertes par la mangeoire BIRD-e développée dans le cadre de l'UMT BIRD (Guettier et al., 2020 ; Mika et al., 2021). Dans un premier temps, nous avons comparé les capacités d'adaptation à deux régimes alimentaires, traditionnel ou comportant des matières premières alternatives au maïs et au soja, de poulets à croissance lente ou rapide tout au long du cycle de production. Cette première expérience a permis de déterminer quelle méthodologie de calcul de l'efficacité alimentaire était la plus pertinente. Dans un second temps, nous avons appliqué cette méthodologie à une expérience de plus grande ampleur, dans deux lignées expérimentales de poulets de chair à croissance rapide sélectionnées de façon divergente sur le pH ultime du filet et nourries avec un régime alternatif. Ces travaux ont permis d'évaluer les possibilités d'amélioration génétique de l'efficacité alimentaire dans ce contexte nutritionnel et de préciser les liens génétiques avec les composantes de l'efficacité (croissance, consommation alimentaire) et les critères de qualité du produit (composition de la carcasse, qualité de la viande) dans les deux lignées aux caractéristiques métaboliques très contrastées. Grâce à ces éléments, nous avons pu dans un dernier temps proposer différentes stratégies de sélection de l'efficacité alimentaire et comparer leur efficacité.

CHAPITRE 1 : Etude bibliographique de l'impact de la composition des régimes avicoles sur les performances

Production encore auxiliaire de la production d'œufs il y a 100 ans, la volaille de chair est dorénavant la viande la plus produite dans le monde avec 26 milliards de poulets produits en 2019, devant la production porcine (FAOSTAT, 2021). A l'échelle continentale, la majorité de la production est localisée en Asie (59%) et sur le continent américain (24% de la production) (FAOSTAT, 2021), les principaux pays producteurs étant la Chine, l'Indonésie, les Etats-Unis et le Brésil. L'Europe des 27 représente quant à elle 9% de la production mondiale. Il existe au niveau mondial une forte demande pour la viande de volaille, considérée comme une source peu onéreuse de protéines (en comparaison de la viande rouge, 3 à 4 fois plus chère) du fait de sa forte efficacité de production. L'indice de consommation, ratio entre la quantité d'aliment consommée et le gain de poids (IC) des poulets de chair à croissance rapide se situe en effet entre 1.5 et 2.0, soit 2.5 à 3.0 fois moins que l'IC des bovins (Smith et al., 2010) et 1.5 à 2 fois moins que celui des porcs (Losinger et al., 1998). Les qualités nutritionnelles et l'absence d'interdits religieux contribuent également au succès mondial de la viande de volailles. Dans le même temps, cette production fait l'objet de nombreuses critiques. Comme pour les autres types d'élevage, elles portent en particulier sur son impact environnemental (Westhoek, 2014).

1. Impact environnemental de la composition des régimes avicoles

Comme le montre la Figure 1.1, l'utilisation de l'espace liée à la production des matières premières des régimes des volailles est la composante principale des impacts environnementaux de la production du poulet de chair européenne (Boggia et al., 2010). La production et la transformation de l'aliment représentent en effet 79% des impacts environnementaux en production standard (STD) et 88% en production label rouge (LR). La différence entre les deux types de production est liée aux différences d'efficacité alimentaire des animaux (Boggia et al., 2010). L'impact sur l'utilisation des surfaces est ainsi 2.5 fois plus fort en production LR qu'en production STD, ce qui correspond à l'écart d'indice de consommation entre ces deux productions, puisque, contrairement aux poulets LR, les STD ont été sélectionnés sur l'efficacité alimentaire.

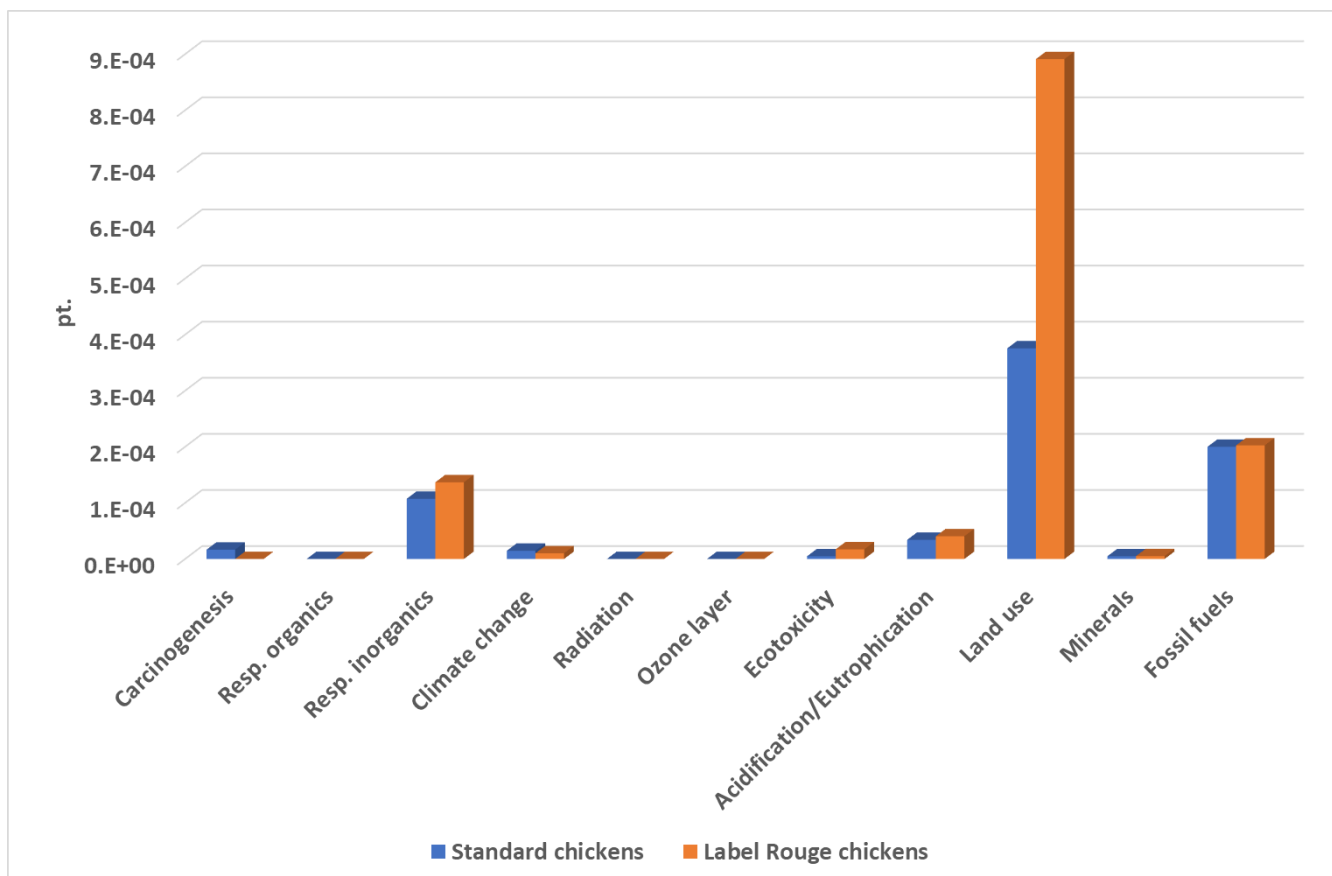


Figure 1.1. Les différents postes d'impact environnemental de la production de poulet de chair standard et label Rouge.

Ces résultats sont exprimés sur une échelle de points normalisés (pt). (D'après Boggia et al., 2010).

Cependant, afin d'atteindre leur poids commercial le plus rapidement possible, la sélection des poulets STD sur la croissance et l'efficacité alimentaire a été réalisée sur des animaux nourris avec des régimes riches en maïs et en soja. Ces matières premières, faciles à digérer et riches en énergie et en protéines, permettent en effet aux animaux d'exprimer pleinement leur potentiel génétique de croissance (Havenstein et al., 2003). Cette production massive entraîne de plus en plus de compétition avec les terres utilisées pour l'alimentation humaine. De plus, la production de soja se fait en grande partie au Brésil et aux USA (FAOSTAT, 2021), parcourt donc de grandes distances pour arriver en Europe et est une des causes de la déforestation de l'Amazonie (Lathuilière et al., 2017). L'accroissement de la production de poulet mondiale s'accompagne d'une demande toujours plus forte en ces matières premières. La multiplication par 10 des rendements en maïs et soja depuis 1935 (Schauberger et al., 2018) a permis de faire face à ce besoin accru. Cependant, ce progrès a été obtenu à la fois par la sélection génétique variétale et par l'intensification de leur culture (Smith et al., 2005, Evenson et Gollin ; 2003), avec l'utilisation de plus en plus importante d'intrants, pesticides et

engrais. Ces cultures sont responsables de la dégradation des sols, du fait de périodes de sol nu pour les monocultures ou de certaines pratiques culturales rendant la matière organique plus accessible et plus facilement oxydable (Wei et al., 2014). Cette oxydation des sols est une des causes de la perte en phosphate, nitrate et carbone des sols (Quinton et al., 2010). Cette perte de qualité des sols nécessite une utilisation toujours plus importante d'intrants pour maintenir le rendement de production des différentes céréales utilisées en alimentation humaine et animale, notamment dans les pays où l'agriculture est la plus intensive (USA, Amériques du Sud, Quinton et al., 2010). Outre cette dépendance aux intrants, le recours à l'irrigation est aussi de plus en plus important pour maintenir les rendements actuels pour les différentes céréales. En effet, si le maïs est une plante très efficace pour l'utilisation de l'eau, c'est une plante d'origine tropicale, dont les besoins physiologiques en eau sont les plus importants l'été sous nos climats, au moment où les précipitations sont les plus faibles. Cette irrigation importante couplée au recours massif en pesticides (90% des intrants de culture du maïs en France ; Crisan, 2020), entraîne un ruissellement important de nitrates entraînant ainsi une pollution des eaux importante (Giuliano et al., 2016).

Même si l'impact carbone de la production de la volaille de chair reste le plus faible des différentes productions de viande (5.4kg de CO₂/kg pour les volailles, 6.1kg de CO₂/kg pour le porc, 23 kg de CO₂/kg pour les bovins, Pelletier et al., 2010 ; Capper, 2012 ; MacLeod, 2013), l'augmentation de la production de viande de volaille va augmenter l'impact environnemental total de la production. En effet, les estimations en 2016 prévoient une augmentation de 39.42 millions de tonnes de la consommation de viande entre 2016 et 2026, la viande de volaille représentant 42% de l'augmentation dans les pays en développement et 54% de l'augmentation dans les pays développés (OCDE/FAO, 2017).

L'aggravation de l'impact environnemental de la production de volaille peut découler de la production croissante des matières premières nécessaires à leur nutrition et aux rejets de gaz à effet de serre dus à leur élevage, en passant par le transport des matières premières pour arriver aux bassins de production, la majeure partie du soja utilisé en Europe étant produite sur le continent américain (Leinonen et Kyriazakis, 2016). Dans le contexte européen qui est le nôtre, une stratégie de limitation de cet impact pourrait passer par une augmentation de l'autonomie protéique, en développant la production locale (Zacharias et al., 2016). En effet, à l'heure actuelle, l'Europe, qui ne consacre que 3% de ses terres arables aux cultures protéiques, ne peut couvrir que 30% de ses besoins protéiques et importe donc 70% de sa production (European Parliament, 2011). Les taux d'incorporation de tourteaux d'oléagineux (tournesol et colza) ou d'autres protéagineux que le soja (pois, féverole et lupin) pourraient alors être augmentés dans les régimes. Les tourteaux de colza et de tournesol sont pour l'instant beaucoup moins utilisés que le soja, car ils sont moins riches en matières azotées et plus riches en cellulose et lignine, bien que le décorticage permette de diminuer ces proportions (Peyronnet et al., 2014). Les protéagineux présentent l'intérêt d'avoir de bons rendements même dans des conditions

peu favorables (Henriquez et al., 2018). Leur teneur en protéines reste toutefois moyenne et variable en fonction des variétés (Koivunen et al., 2016), avec la présence pour certaines de facteurs antinutritionnels pouvant impacter la prise alimentaire (Jeziorny et al., 2010). Une troisième source de matières premières alternatives est l'utilisation des coproduits des huileries, des drèches de blés ou de maïs. Ces produits présentent toutefois une qualité variable en fonction de la qualité du séchage et de la matière première (Böttger and Südekum, 2017). La qualité variable de ces drèches impacte leur digestibilité et composition et rend leur utilisation hasardeuse (Buenavista et al. 2021 ; Cozannet et al. 2010). En ce qui concerne l'impact environnemental, il a été montré qu'utiliser un régime riche en tourteaux de tournesol et de colza, féverole et drèches de maïs permettrait de diminuer de 12 à 41% les émissions de gaz à effet de serre par rapport à un régime riche en tourteau de soja (Méda et al, 2015 ; Leinonen et al., 2013 ; Tallentire et al., 2018). Cette différence de composition et de teneur en protéines pose néanmoins la question de l'impact sur les performances des animaux. Bien que de nombreuses études portent sur ce remplacement, chez des animaux à croissance lente ou à croissance rapide, les conclusions de ces dernières sont parfois contradictoires, améliorant, ne changeant pas ou détériorant l'efficacité alimentaire des animaux (Min et al., 2009 ; Tuunainen et al., 2016 ; Ashayerizadeh et al., 2018). Afin d'obtenir une synthèse des effets des différentes matières premières pouvant remplacer le triptyque maïs-soja-blé, dans différents contextes génétiques, une méta-analyse a donc été menée pour mettre en avant les effets sur les performances de ces différentes matières de remplacement.

2. Impact sur les performances de la composition des régimes avicoles

2.1. Description de la base de données

2.1.1. Constitution de la base de données

La base de données a été constituée en utilisant les outils Web of Science et Pubmed. Une combinaison des mots clés du champ lexical de l'efficacité alimentaire (IC, feed conversion ratio, feed efficiency et performances), de la volaille (broiler, chicken, poultry), et des principales matières premières utilisables en remplacement du soja (canola, rapeseed, sunflower, faba bean, et Dried Distillers Grains with Solubles) a été utilisée. La recherche a été restreinte aux études menées entre 1970 et 2021. Au total, 144 études ont été obtenues. Une première étape de filtration a été appliquée sur la base de données en retirant les articles qui répondaient à un des critères d'exclusion suivant :

- L'article portait sur une espèce autre que le poulet de chair en croissance (Caille, Canard, Dinde, Poule pondeuse),
- La source ne fournissait pas les résultats (résumé de conférence par exemple),
- Il s'agissait d'une synthèse bibliographique sans données nouvelles,
- L'article étudiait l'effet de l'ajout d'une huile et non pas de la matière première sous forme brute, de tourteau ou de farine,
- La composition du régime n'était pas donnée,
- Le régime alternatif était appliqué aux parents des animaux mesurés et non aux animaux mesurés eux-mêmes,
- Les périodes d'études n'étaient pas délimitées,
- L'étude portait sur l'impact sur les organes et non pas sur les performances,
- L'étude était une présentation en congrès des résultats présents dans un autre article.

Suite à cette étape de filtration, 90 études ont été retenues.

2.1.2. Caractéristiques du régime prises en compte

Les paramètres extraits de ces 90 études comprenaient, en premier lieu, les caractéristiques des régimes utilisés pour chaque expérience :

- Le taux de protéine du régime (CP) et l'énergie métabolisable (EMAn, de 2136 à 3625 Kcal.kg⁻¹) ainsi que les taux de méthionine, lysine et cystéine.
- Les proportions des principales céréales : blé (P_BLE, de 0 à 74%), maïs (P_MAIS, de 0 à 60%), sorgho (P_SORG, de 0 à 64%) et orge (P_ORGE, de 0 à 59%).
- Les proportions des principales sources de protéines : soja (P_SOJA, de 0 à 63%), drèches de distillerie (P_DREC, de 0 à 30%), tournesol (P_TOUR, de 0 à 65.6%), colza (P_COLZ, de 0 à 46.4%), féverolle (P_FEVE, de 0 à 50%), pois (P_POIS, de 0 à 35.6%) et lupin (P_LUPN, de 0 à 36%).
- La période de distribution du régime (le début et la fin de la période, respectivement DEB_REG, de 1 à 43 jours et FIN_REG, de 7 à 120 jours).

Afin de permettre l'analyse des données hétérogènes des différentes études, les différentes proportions de céréales et protéines ont été divisées par la somme des principaux composants du régime. Ainsi P_BLE, par exemple, devient :

$$P_{BLE} = \frac{P_{BLE}}{P_{BLE} + P_{MAIS} + P_{SORG} + P_{ORGE} + P_{SOJA} + P_{DREC} + P_{TOUR} + P_{COLZ} + P_{POIS} + P_{FEVE} + P_{LUPN}}$$

L'animal reçoit différents régimes au cours de sa croissance. Afin de prendre en compte cette évolution, un régime moyen a été calculé pour chacune des périodes de mesure des caractères. Pour chaque matière première, une proportion moyenne a été calculée au prorata du temps de distribution des différents régimes donnés aux animaux durant la période d'étude.

2.1.3. Autres critères enregistrés : conditions d'élevage, génotype, âge

En dehors de l'aliment, les conditions générales d'élevage ont été enregistrées dans la variable environnement d'élevage ENVT. Cette variable comprenait les modalités « au sol » avec ou sans accès à un parcours extérieur (Sol, 64% des études) ou « en cage », qu'elle soit individuelle ou collective (Cage, 36% des études), ainsi que le nombre de parquets ou de cages étudiés (de 2 à 64).

Les paramètres relatifs aux animaux ont également été extraits des différentes études. Il n'a pas été possible de distinguer poulets standards et poulets labels, la deuxième catégorie étant trop peu représentée. Les génotypes ont donc été distingués d'après le gain de poids moyen des animaux et répartis en 3 catégories de fréquence équivalente: SLOW ($GP \leq 50.46 \text{ g.j}^{-1}$, 30%), MID ($50.47 \text{ g.j}^{-1} \leq GP \leq 64.09 \text{ g.j}^{-1}$, 34,4%) et FAST ($GP \geq 64.1 \text{ g.j}^{-1}$, 35,6%). Le sexe des animaux étudiés a été enregistré (55.7 % de mâles, 7.2% de femelles et 37.1% en sexes mélangés).

Finalement, des données concernant l'âge de mesure des caractères ont été enregistrées : bornes de la période de mesure des caractères étudiés (AGE_DEB, de 1 à 101 jours et AGE_FIN, de 7 à 122 jours), âge de mesure du poids (AGE_PV en jour, de 1 à 120 jours). L'âge médian de la période étudiée (AGE_MED) a été calculé comme la moyenne entre AGE_DEB et AGE_FIN pour les caractères mesurés sur une période (indice de consommation, consommation alimentaire et gain de poids). La durée de la période étudiée (DUREE) a été calculée comme la différence entre AGE_FIN et AGE_DEB. Enfin, l'âge d'abattage (de 14 à 120 jours) a également été enregistré.

2.1.4. Caractères enregistrés

Ont été extraits des articles les caractères suivants : indice de consommation (IC, 896 données), consommation alimentaire (CONS en g.j^{-1} , 877 données), gain de poids quotidien (GP en g.j^{-1} , 880 données), poids à un âge donné (PV en g, 552 données). Pour chaque caractère, les données moyennes par traitement ont été notées, ainsi que leurs écarts-types quand ils étaient présents.

2.2. Analyses statistiques

Selon les variables, les analyses statistiques ont été réalisées sur les données brutes ou sur les données transformées (transformation logarithmique ou racine carrée). Pour chaque paramètre étudié, nous avons retenu les résultats de l'analyse statistique pour laquelle nous obtenions les meilleurs skewness et kurtosis sur les résidus de l'analyse (Tableau 1.1). Ainsi, une transformation logarithmique a été appliquée à l'indice de consommation et une transformation racine carrée sur PV, CONS et GP pour normaliser la distribution des données. Les abréviations de ces caractères pour la suite sont respectivement Log(IC), sqrt(PV), sqrt(CONS) et sqrt(GP).

Tableau 1.1. Caractéristiques de la normalité des résidus pour les différents caractères étudiés avant et après transformation.

Caractère	Données brutes		Données transformées	
	Skewness	Kurtosis	Skewness	Kurtosis
IC	2.51	21.70	0.83	4.24
PV	1.66	9.56	0.70	7.90
CONS	0.98	6.79	0.52	4.32
GP	-0.21	2.75	0.003	2.07

La précorrection des données pour l'effet aléatoire de l'étude, classiquement appliquée dans les méta-analyses, n'a pas été retenue dans notre cas, car elle induisait un trop fort décalage entre les valeurs réelles et les valeurs modélisées par rapport à un modèle sans précorrection. Avec précorrection, les valeurs de IC modélisées étaient ainsi 11 à 14 fois plus faibles que les valeurs réelles.

Afin de définir le meilleur modèle pour chacun des caractères étudiés, nous avons utilisé la procédure GLMSELECT (SAS Institute Inc., 2013) qui permet une sélection automatisée du meilleur modèle. Les effets fixes proposés étaient le type d'animal (TYPE), l'environnement d'étude (ENVT), le sexe des animaux (SEXE). Les covariables proposées étaient l'effet linéaire, quadratique et cubique de l'âge médian et de la durée de la période étudiée (AGE_MED, DUREE). Les covariables liées à la composition du régime comprenaient aussi les effets linéaires des différents taux de matières premières (P_BLE, P_MAIS, P_SORG, P_ORGE, P_SOJA, P_DREC, P_TOUR, P_COLZ, P_POIS, P_FEVE, P_LUPN), du taux de protéines (CP) et de l'énergie métabolisable du régime (EMAn). Pour sqrt(PV), l'effet de l'âge médian de la période a été remplacé par l'effet de l'âge à la mesure (AGE_PV) et l'effet de la durée a été retiré car redondant avec l'effet précédent. Toutes les interactions deux à deux entre ces différents effets et covariables ont été incluses dans la recherche de modèle.

Afin de prendre en compte les différences de fiabilité des études, une pondération a été ajoutée aux données de chaque étude. Le nombre de répétitions par traitement (parquets, cages) a été divisé en 5 quantiles et une pondération de 1 (plus petit nombre de répétitions) à 5 (plus grand nombre de répétitions) a été attribuée aux études. La pondération a été augmentée de 1 dans le cas où les études présentaient une description complète des données environnementales et fournissaient moyenne et écart-type des caractères pour chaque traitement. La pondération allait donc de 1 à 6. Elle a été utilisée par le biais de la commande WEIGHT de la procédure GLMSELECT (SAS Institute Inc., 2013).

2.3. Résultats

Les différents effets significatifs de l'analyse sont présentés dans le Tableau 1.2. Parmi les 441 effets et interactions introduits dans la recherche de modèle, 41 ressortent comme ayant un impact sur les performances des animaux. Les différents modèles obtenus suite à la recherche de modèle sont présentés dans le Tableau 1.3.

Pour montrer l'importance relative des différents effets mis en évidence dans le modèle, nous avons déterminé, à partir des données des groupes témoins des différentes études, une situation de référence avec un régime contenant 45% de maïs, 10% de blé, 30% de soja et 20% de CP, sur des animaux à vitesse de croissance rapide (FAST) et élevés au sol. La valeur de DUREE a été fixée à 21 jours. A partir de cette situation de référence nous avons fait varier la part protéique et énergétique, tout en cherchant à garder 55% de matière énergétique et 30% de matière protéique dans chacune des variations étudiées. Ainsi l'ajout de tournesol ou de colza dans le régime s'accompagne d'une baisse du taux de soja, l'ajout de blé et de sorgho par une diminution d'abord de la part en maïs du régime puis du blé quand il n'est plus possible de diminuer cette part.

Tableau 1.2. Significativité des effets directs et interactions sur les performances des animaux.

	Caractère ^a					Caractère ^a			
	sqrt(GP)	sqrt(CONS)	log(IC)	sqrt(PV)		sqrt(GP)	sqrt(CONS)	log(IC)	sqrt(PV)
	Effets directs ^b					Interactions			
AGE_PV				<.0001	AGE_MED*DUREE				<.0001
AGE_MED	<.0001	<.0001	<.0001		AGE_MED*ENVT		<.0001		
AGE_PV ²				<.0001	AGE_MED*TYPE	<.0001	<.0001		
AGE_MED ²	<.0001	<.0001			AGE_MED ² *TYPE	<.0001			
AGE_PV ³				<.0001	AGE_PV ² *TYPE				<.0001
AGE_MED ³	<.0001	<.0001			P_BLE*AGE_MED		<.0001		
P_BLE	0.0056	<.0001		<.0001	P_BLE*AGE_PV ²				<.0001
CP	<.0001	<.0001	<.0001		P_BLE*TYPE	<.0001	<.0001		<.0001
DUREE	<.0001		<.0001		P_BLE*P_TOUR	<.0001			
DUREE ³		<.0001			CP*P_BLE	<.0001			
ENVT		<.0001	<.0001	<.0001	CP*DUREE	<.0001			
TYPE	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	CP*DUREE ³		<.0001		
P_MAIS		<.0001	<.0001		CP*ENVT				<.0001
P_COLZ			<.0001		CP*TYPE	<.0001	<.0001		<.0001
P_SOJA	<.0001		0.0128	0.0008	CP*P_SOJA	0.0022			
P_SORG		0.0007			CP*P_TOUR	0.0005			<.0001
P_TOUR	<.0001		<.0001		TYPE*ENVT				<.0001
					P_MAIS*P_BLE		<.0001		
					P_MAIS*DUREE				
					P_MAIS*ENVT		<.0001	<.0001	
					P_MAIS*TYPE		<.0001		
					P_SOJA*AGE_MED ²	0.0059			
					P_SOJA*TYPE	<.0001			
					P_TOUR*DUREE	0.0015			
	R ² du modèle								
	0.91	0.87	0.85	0.78					

^a : sqrt(CONS) : racine carrée de la consommation journalière ; sqrt(GP) : racine carrée du gain de poids quotidien ; sqrt(PV) : racine carrée du poids vif ; log(IC) : logarithme de l'indice de consommation

^b : P_SOJA : Proportion de soja ; P_TOUR : Proportion de tournesol ; P_COLZ : Proportion de colza ; P_BLE : Proportion de blé ; P_MAIS : proportion de maïs ; P_SORG : proportion de sorgho ; CP : Taux de protéine du régime ; AGE_MED : Age médian de la période étudiée ; AGE_PV : Age de mesure du poids ; DUREE : Durée de la période étudiée ; ENVT : Environnement ; TYPE : Type d'animaux

Tableau 1.3. Equations des modèles retenus pour chaque variable.

Trait ¹	Termes non spécifiques ²	Cage	MID	MID*Cage	FAST	FAST*Cage
Sqrt(PV)	-1.553+0.113*P_SOJA-0.0823*P_BLE+1.69*AGE_PV- 0.019*AGE_PV ² +0.000027223*P_BLE*AGE_PV ² +0.000065831*AGE_PV ³	-1.18	-1.57+0.098*P_BLE +0.0023*AGE_PV ²		-3.252+0.157*P_BLE+0.006*AGE_PV ²	
sqrt(CONS)	-3.97+0.394*CP-0.017*P_MAIS-0.0366*P_BLE- 0.00052*P_BLE*P_MAIS+0.0443*P_SORG+0.387*AGE_MED+0.000687*P_BLE*AGE_MED- 0.00565*AGE_MED ² +0.00002603*AGE_MED ³ +0.00000973*DUREE ³ - 0.00000063*CP*DUREE ³	0.314- 0.017*P_MAIS +0.0146*AGE_MED	10.22-0.52*CP+0.027*P_MAIS +0.026*P_BLE- 0.0013*AGE_MED		4.54-0.388*CP+0.055*P_MAIS+0.0775*P_BLE +0.073*AGE_MED	
sqrt(GP)	-13.349+0.734*CP+0.168*P_SOJA-0.006*CP*P_SOJA+0.07*P_BLE- 0.00328*CP*P_BLE+0.327*P_TOUR-0.014*CP*P_TOUR- 0.002*P_BLE*P_TOUR+0.3088*AGE_MED-0.0048*AGE_MED ² - 0.00000717*P_SOJA*AGE_MED ² +0.0002391*AGE_MED ³ +0.0353*DUREE- 0.0027*CP*DUREE-0.00068*P_TOUR*DUREE		12.128-0.557*CP- 0.003*P_SOJA+0.00024*P_BLE +0.068*AGE_MED- 0.0019*AGE_MED ²		6.889-0.32*CP- 0.0228*P_SOJA+0.0218*P_BLE+0.12*AGE_MED- 0.00189*AGE_MED ²	
log(IC)	1.3456-0.05*CP-0.0045*P_SOJA+0.00324*P_MAIS-0.0024*P_COLZ- 0.0296*P_TOUR+0.0013*CP*P_TOUR+0.0122*AGE_MED+0.00869*DUREE- 0.000071*DUREE*P_MAIS-0.000087*AGE_MED*DUREE	-1.014+0.0499*CP- 0.00246*P_MAIS	-0.82+0.037*CP	-0.037	-0.6713+0.0277*CP	-0.094

1 : sqrt(CONS) : racine carrée de la consommation journalière ; sqrt(GP) : racine carrée du gain de poids quotidien ; sqrt(PV) : racine carrée du poids vif ; log(IC) : logarithme de l'indice de consommation

2 : P_SOJA : Proportion de soja ; P_TOUR : Proportion de tournesol ; P_COLZ : Proportion de colza ; P_BLE : Proportion de blé ; P_MAIS : proportion de maïs ; P_SORG : proportion de sorgho ; CP : Taux de protéine du régime ; AGE_MED : Age médian de la période étudiée ; AGE_PV : Age de mesure du poids ; DUREE : Durée de la période étudiée

2.3.1. Effet sur l'efficacité alimentaire

L'efficacité alimentaire est impactée par la composition de l'aliment, que ce soit au niveau de la composition en matières premières énergétiques (pourcentage de maïs), protéiques (de colza, de tournesol et de soja) que du taux de protéines dans la ration. On observe également des interactions entre le pourcentage de tournesol et le taux de protéines, ainsi qu'entre le pourcentage de maïs et les conditions de mesure (ENVT).

En dehors de la composition de l'aliment, les effets de la vitesse de croissance, de l'environnement de mesure et de l'âge de la mesure affectent significativement l'indice de consommation. La vitesse de croissance présente également une interaction significative avec le taux de protéines du régime.

2.3.1.1. Effet de l'environnement et du type d'animal

L'effet du type d'animaux passe par un effet direct de la catégorie de vitesse de croissance (Figure 1.2), d'une interaction entre vitesse de croissance et taux protéique de la ration (Figure 1.3) et d'une interaction entre vitesse de croissance et type d'élevage (Figure 1.4). L'effet direct de la vitesse de croissance montre un IC 8.3-12.5% plus important pour les SLOW que pour les autres types d'animaux sur l'ensemble de la période, ce qui se traduit par un écart de 0.12-0.18 points d'indice en tout début de croissance et de 0.22-0.27 en fin de croissance (Figure 1.2). Les animaux MID et FAST présentent des valeurs d'indice plus proches, ces derniers ayant un IC 3.7% plus faible que les MID tout au long de leur vie, ce qui représente 0.08 points d'indice à 42 j.

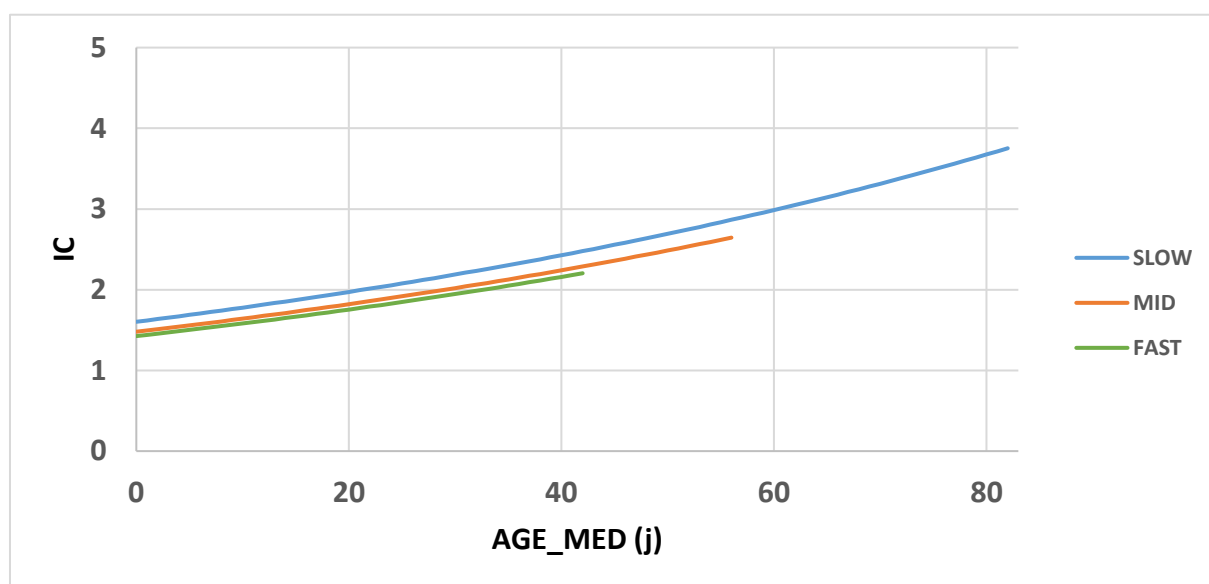


Figure 1.2. Effet du type de l'animal sur l'indice de consommation

Contrairement à ce que l'on aurait pu attendre, l'interaction entre vitesse de croissance et le taux de protéines de la ration se traduit par un effet plus fort du taux de protéines de la ration pour les animaux SLOW que pour les FAST et les MID, bien que ces derniers aient des besoins plus importants pour leur croissance. Ainsi, dans la situation de référence, passer d'un taux de protéines de 15 à 25% se traduit par une réduction de l'IC à 42 j de 1.25 chez les SLOW contre 0.34 et 0.49 chez les MID et les FAST, respectivement (cf. Figure 1.3).

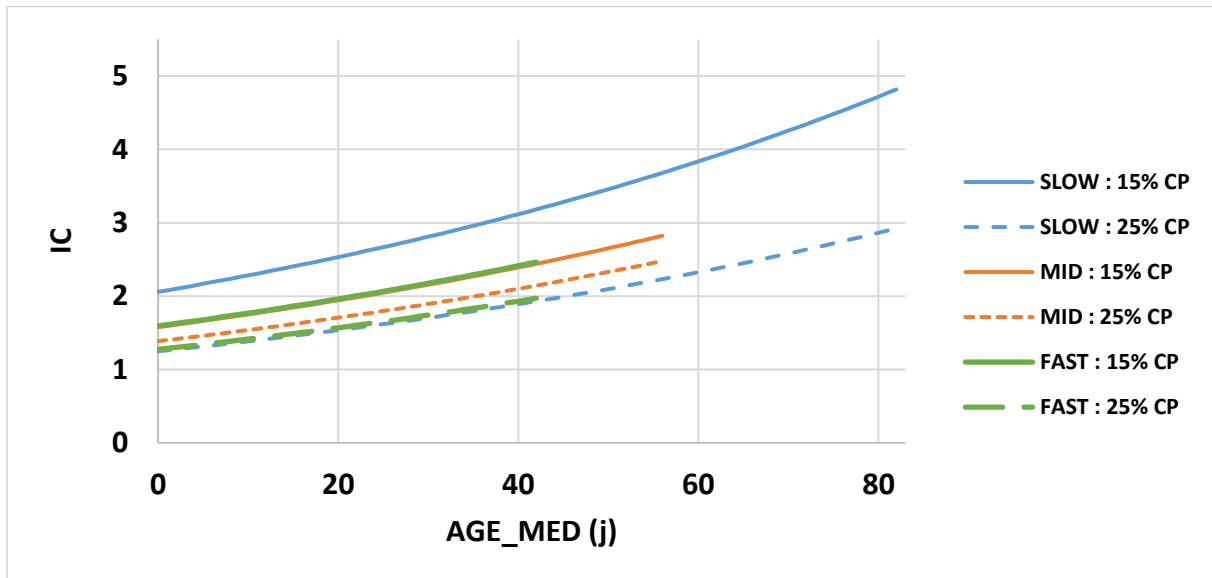


Figure 1.3. Effet d'interaction entre type d'animal et taux protéique de la ration sur l'indice de consommation

L'effet d'interaction entre vitesse de croissance et mode d'élevage est équivalent à l'interaction vitesse-taux protéique pour les MID et les FAST (Figure 1.4), mais beaucoup moins fort pour les SLOW. L'IC est plus faible pour les animaux élevés en cage, avec une différence d'autant plus marquée que la vitesse de croissance est importante. L'IC des animaux FAST est ainsi 18 à 20% plus important au sol alors que cette différence n'est que de 9 à 12% pour les animaux SLOW. Les animaux MID présentent une différence intermédiaire entre ces deux souches, entre 13 et 15%. Ceci montre l'impact du niveau de l'activité physique et des interactions entre congénères sur ce caractère et l'importance de se placer dans des conditions de mesure proches du milieu de production, au sol, du poulet de chair.

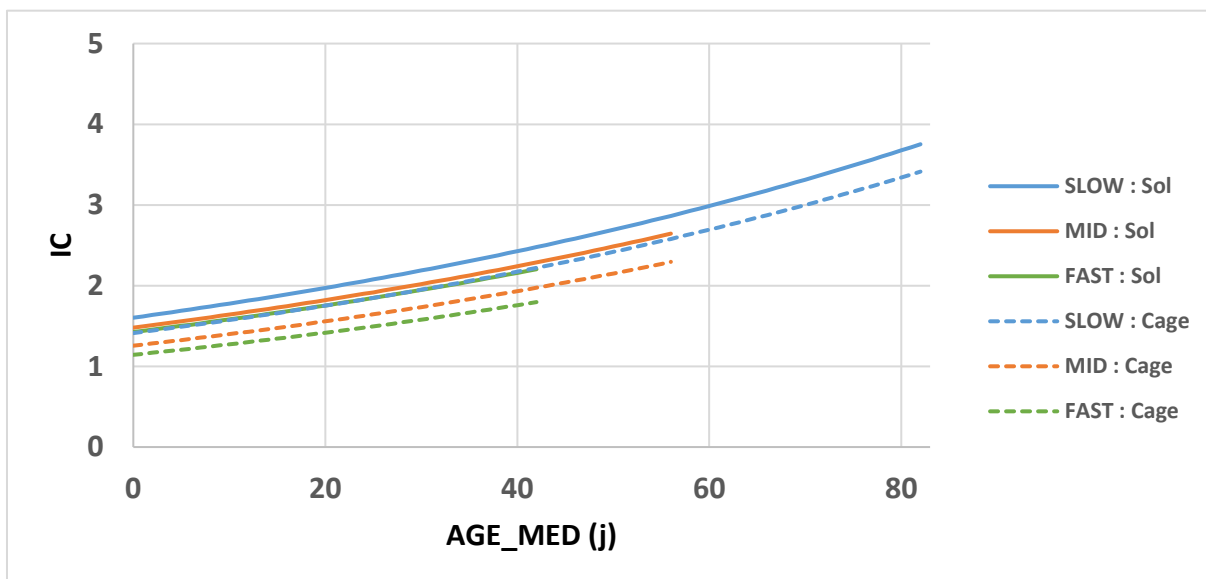


Figure 1.4. Effet d'interaction entre environnement et type d'animal sur l'indice de consommation

2.3.1.2. Effet du taux et de la source de protéines dans la ration

Le taux de CP dans la ration présente un effet d'interaction croisée avec le type d'élevage sur l'indice de consommation. En effet, son augmentation induit une diminution de l'indice quand les animaux sont élevés au sol, mais une augmentation quand les animaux sont élevés en cage (Figure 1.5). Une augmentation de 5 % du taux protéique de la ration se traduit par une diminution du Log(IC) de 0.25 au sol mais à une augmentation de 0.14 en cage. Avec le plus fort taux protéique (25%), l'effet du type d'élevage est faible, alors que la différence sol/cage est forte lorsque la ration contient moins de protéines.

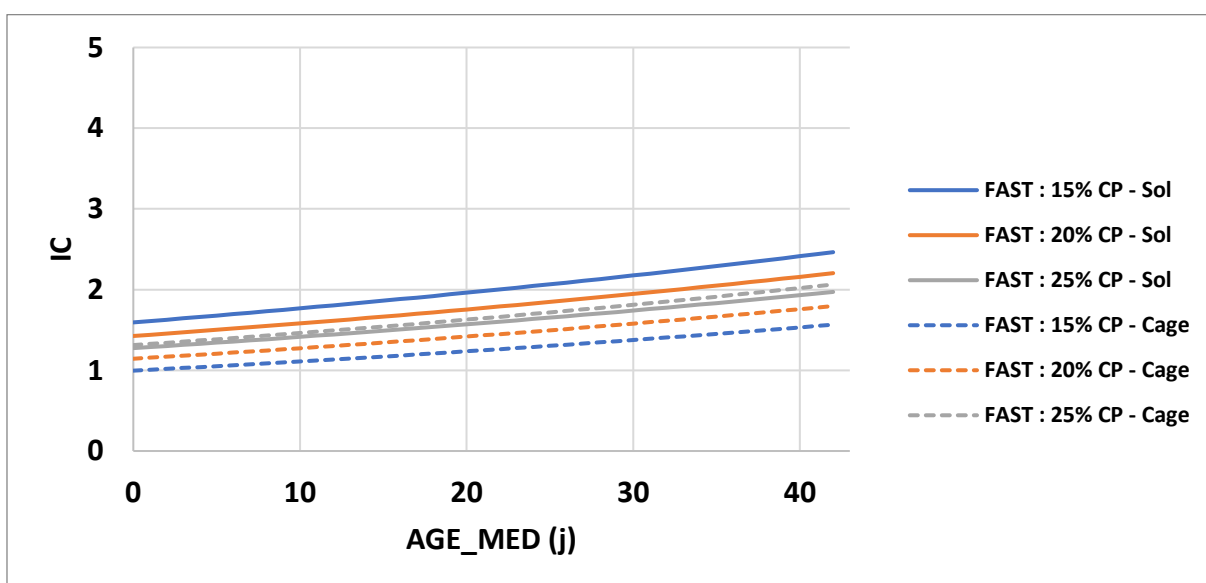


Figure 1.5. Effet de l'interaction entre type d'élevage et taux protéique de la ration

Au-delà de la quantité totale de protéines, la source de protéines influe également sur l'indice de consommation, mais cet effet est beaucoup plus faible que celui du taux protéique (Figure 1.6). Dans le cadre d'une substitution totale du soja par du tournesol ou du colza, on observe une augmentation de l'efficacité alimentaire à 42 jours de 0.06 et 0.50, respectivement (Figure 1.6).

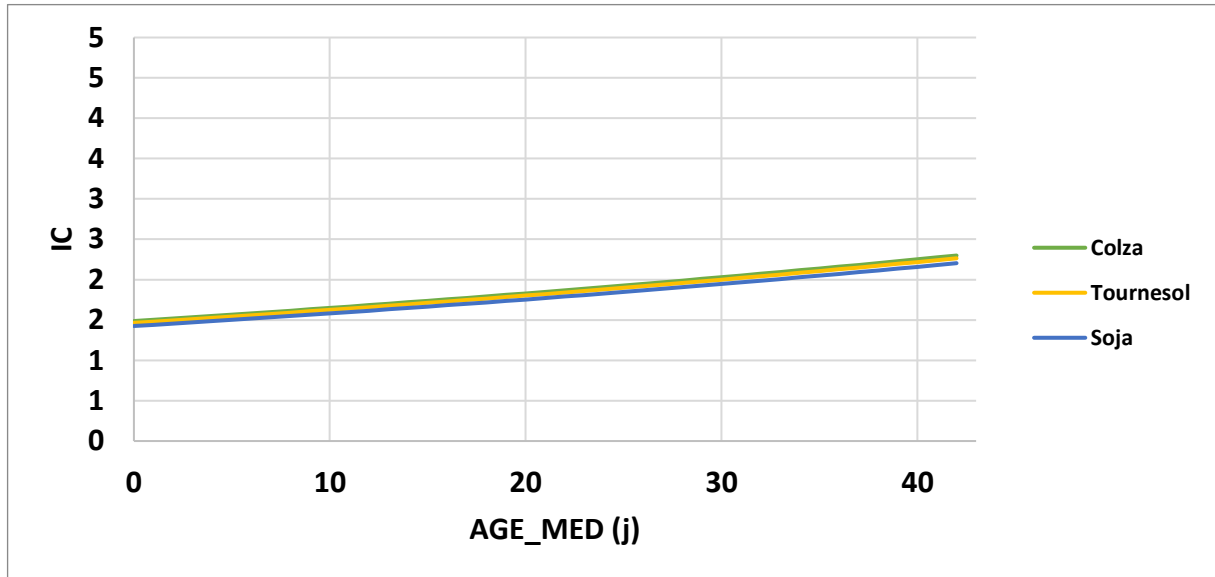


Figure 1.6. Effet de la matière première sur l'indice de consommation

Cela doit être nuancé dans le cas du tournesol, qui présente une interaction faible mais significative avec le taux de protéines dans l'aliment. Ainsi, pour un CP à 20% ou 22%, passer de 15 à 25% de tournesol dégrade respectivement l'indice de 0.02 ou 0.08, alors que pour un CP de 18%, ce dernier sera amélioré de 0.04 en passant de 15 à 25% de tournesol.

2.3.1.3. Effet du taux et de la source de matière première énergétique

Le taux de maïs dans la ration présente un effet direct défavorable très faible sur l'indice, mais qui est tempéré par une interaction avec la durée de mesure et donc indirectement l'âge des animaux. Ainsi, passer de 30 à 50% de maïs sur une durée de 42 jours fera passer l'indice de 2.13 à 2.22.

Conclusions sur l'efficacité alimentaire

La vitesse de croissance et le taux protéique de l'aliment sont les principaux effets qui influencent l'indice de consommation, les animaux à croissance rapide et ceux nourris avec des régimes riches en protéines étant les plus efficaces. L'influence du milieu d'élevage (cage vs sol) en interaction avec ces deux critères principaux (vitesse de croissance, taux protéique de l'aliment) indique qu'il est indispensable de mesurer l'indice de consommation dans des conditions d'élevage réelles, les conclusions obtenues en cage pouvant être invalidées quand les animaux sont élevés au sol.

L'influence de la composition des régimes sur l'indice se concentre sur l'utilisation de tourteau de colza ou de tournesol en remplacement du soja, la féverolle, le pois, les DDGS et le lupin ne présentant pas d'effet significatif sur l'efficacité alimentaire. Le colza et le tournesol rendent les animaux moins efficaces, quel que soit leur taux d'inclusion.

2.3.2. Effet sur la consommation alimentaire

La consommation journalière est dépendante de la composition de l'aliment. Comme pour l'indice de consommation, elle est influencée par le taux protéique de la ration. En revanche, contrairement à l'indice, elle varie plus en fonction de la matière première énergétique utilisée (maïs, sorgho, blé) que par les matières premières protéiques (soja, tournesol, colza). Des interactions sont également observées entre le pourcentage de maïs et le pourcentage de blé ou les conditions de mesure (ENVT). Une interaction est aussi observable pour le pourcentage de blé avec l'âge des animaux (AGE_MED).

La vitesse de croissance, l'âge de mesure et l'environnement impactent aussi la consommation journalière des animaux. La vitesse de croissance affecte celle-ci de nombreuses manières, des interactions significatives pouvant être observées avec le pourcentage de blé, de maïs et le taux de protéines dans la ration.

2.3.2.1. Effet de l'environnement et du type d'animaux

L'effet du type d'animal suit la courbe de croissance des animaux et varie donc avec l'âge des animaux. Les animaux MID et SLOW présentent des courbes de consommation parallèles tout au long de l'élevage, les premiers présentant une consommation de 24 à 129% plus élevée selon l'âge. En revanche, la différence entre les animaux FAST et SLOW s'accroît avec l'âge. Présentant d'abord une consommation d'un gramme plus importante sur les 3

premiers jours, les animaux FAST consomment finalement 75 g de plus que les SLOW, à 42 jours (Figure 1.7).

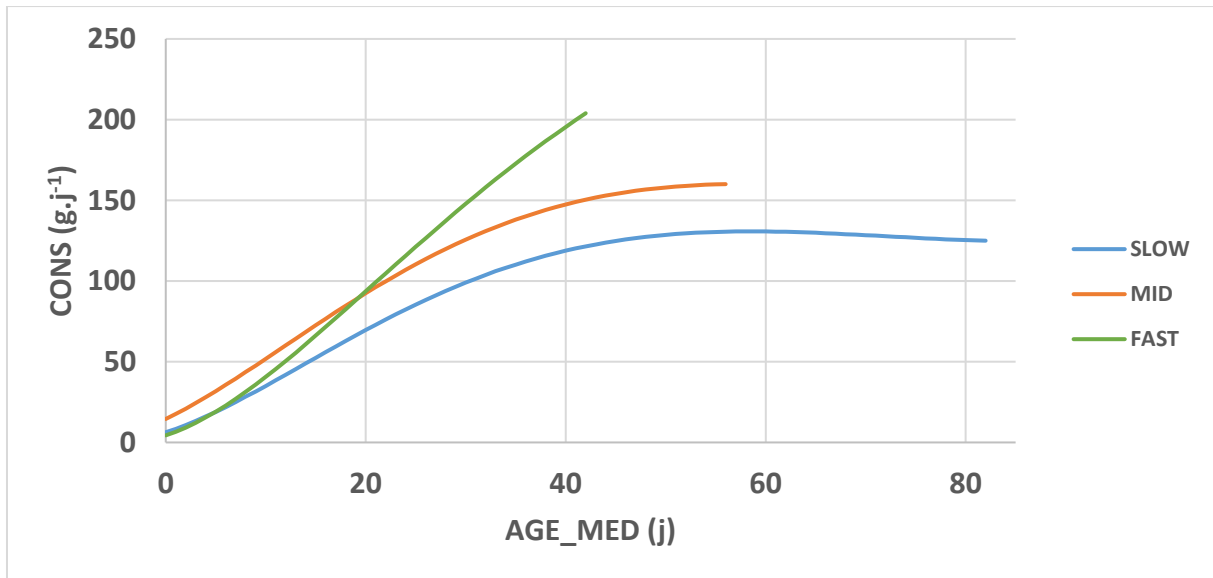


Figure 1.7. Effet du type d'animal sur la consommation

L'interaction entre vitesse de croissance et taux de protéines de la ration se traduit par un effet plus fort du taux de protéines de la ration pour les animaux SLOW que pour les FAST et les MID. L'effet est en effet quasi nul pour les animaux FAST (Figure 1.8). Ainsi, dans la situation de référence, passer d'un taux de protéines de 15 à 25% se traduit par une augmentation de la consommation à 42 j de 117 g chez les SLOW et à une diminution de 32 g chez les MID (Figure 1.8).

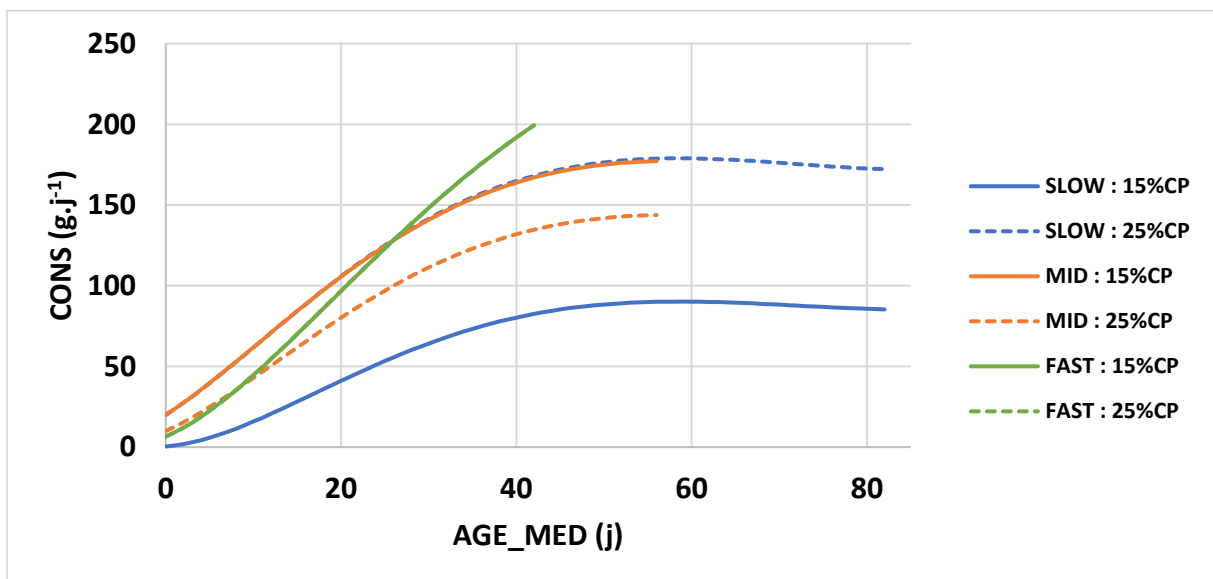


Figure 1.8. Interaction entre le type d'animal et le taux protéique dans la ration sur la consommation

L'interaction entre vitesse de croissance et environnement induit une consommation plus faible en cage jusqu'à 29 jours quelque soit la vitesse de croissance des animaux. Sur cette période, la différence est toutefois la plus faible pour les animaux MID, -7.2% en moyenne, la différence pour les animaux SLOW et FAST étant respectivement de -9.1% et 8.3%. Après ce jour la consommation devient plus importante en cage est la différence est plus importante plus la vitesse de croissance est faible, +2.9% à 42 j. pour les SLOW, 2.7% pour les MID et 2.3% pour les FAST (Figure 1.9).

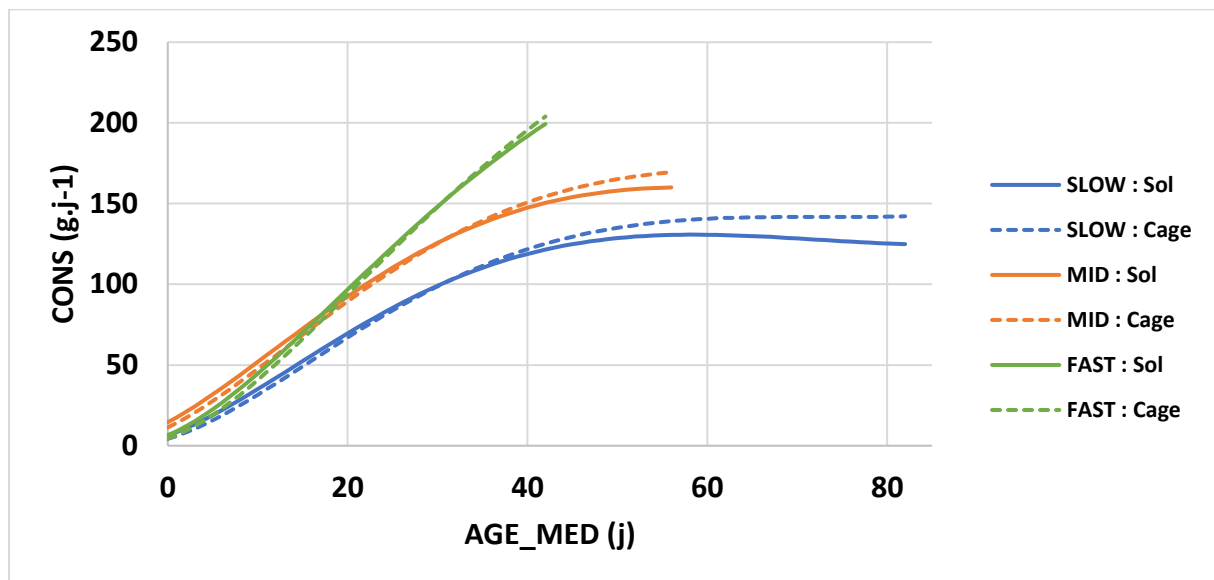


Figure 1.9. Effet d'interaction entre environnement et type d'animal sur l'indice de consommation

La consommation est influencée par une interaction entre la vitesse de croissance et la proportion de blé (Figure 1.10a) ou de maïs (Figure 1.10b). Pour les animaux FAST, la consommation avec le régime le plus riche en blé ou en maïs est respectivement 13.1 g plus importante et 6.8 g plus faible que celle avec le régime le moins riche. Pour les animaux MID, le taux de blé ou de maïs ne change quasiment pas la consommation (au maximum 3.0 g de différence à 15 jours, pour le maïs). En revanche, pour les animaux SLOW, une augmentation de 10% du taux de blé ne modifie pas la consommation durant les 10 premiers jours. Après ce dernier, cet accroissement de 10% du taux de blé augmente la consommation jusqu'à la fin de la vie des animaux, jusqu'à 12.6 g de différence à 82 jours. Pour ces mêmes animaux, augmenter de 10% le taux de maïs fait très légèrement augmenter la consommation sur les 39 premiers jours, avec une différence maximale de 2.4 g, puis baisser la consommation jusqu'à 12 semaines, pour une différence finale de 6.6 g.

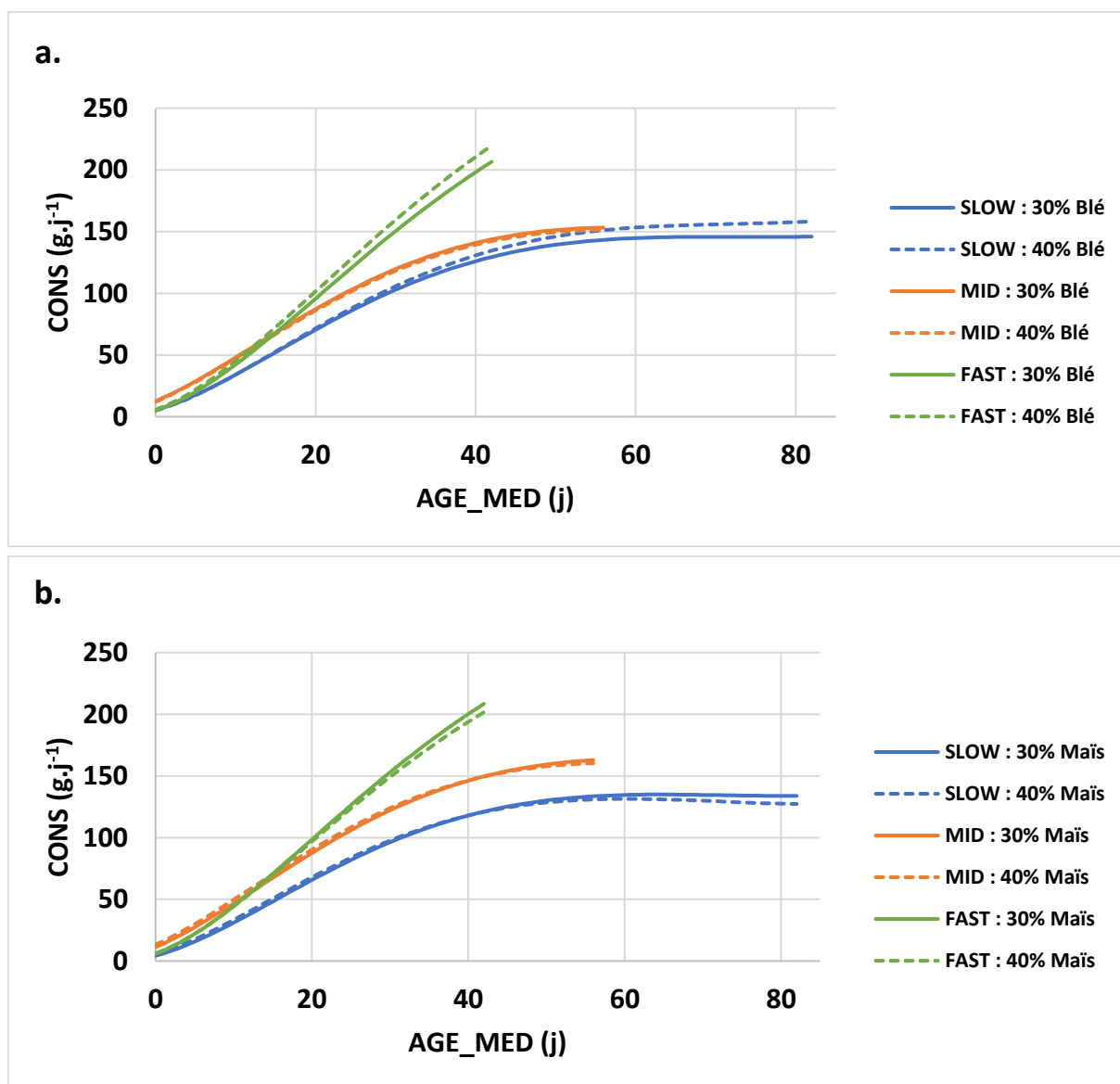


Figure 1.10. Interaction entre le type d'animal et le taux de blé (a) ou de maïs (b) dans la ration

L'environnement d'étude modifie l'évolution de la consommation. En effet, pour un régime contenant 40% de maïs, une consommation de 0.3 à 2.9 g plus faible peut être observée pour les animaux de moins de 25 jours élevés en cage. Après 25 jours, les animaux élevés au sol présentent une consommation plus faible jusqu'à la fin de leur vie, la différence avec ceux élevés en cage atteignant 7.1 g à 42 jours. Cette différence est d'autant plus marquée que le taux de maïs est faible dans la ration. En effet, pour un régime contenant 30% de maïs la différence de consommation à 42 jours atteint 12.2 g (Figure 1.11).

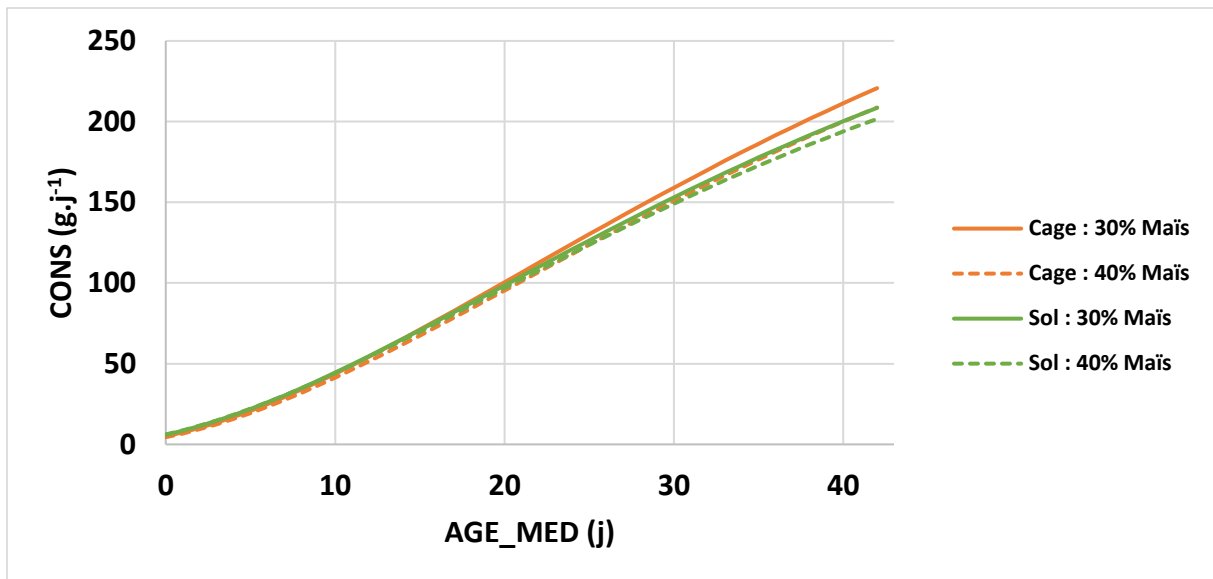


Figure 1.11. Effet de l'environnement et du taux maïs dans la ration

2.3.2.2. Effet de la source d'énergie dans la ration

La source d'énergie dans la ration impacte la consommation principalement dans le cas du blé, pour lequel la consommation est plus importante qu'avec du sorgho et du maïs, ce dernier étant associé à une consommation plus faible à taux d'incorporation équivalent (40%, Figure 1.12). La présence d'une interaction entre le pourcentage de blé et l'âge se traduit par un effet du blé de plus en plus fort avec l'âge. Ainsi, la consommation alimentaire, quasi-identique en début de croissance avec les 3 matières premières devient 10.9 g plus élevée avec du sorgho qu'avec du maïs et 18.1 g plus élevée avec du blé que du maïs à 42 jours.

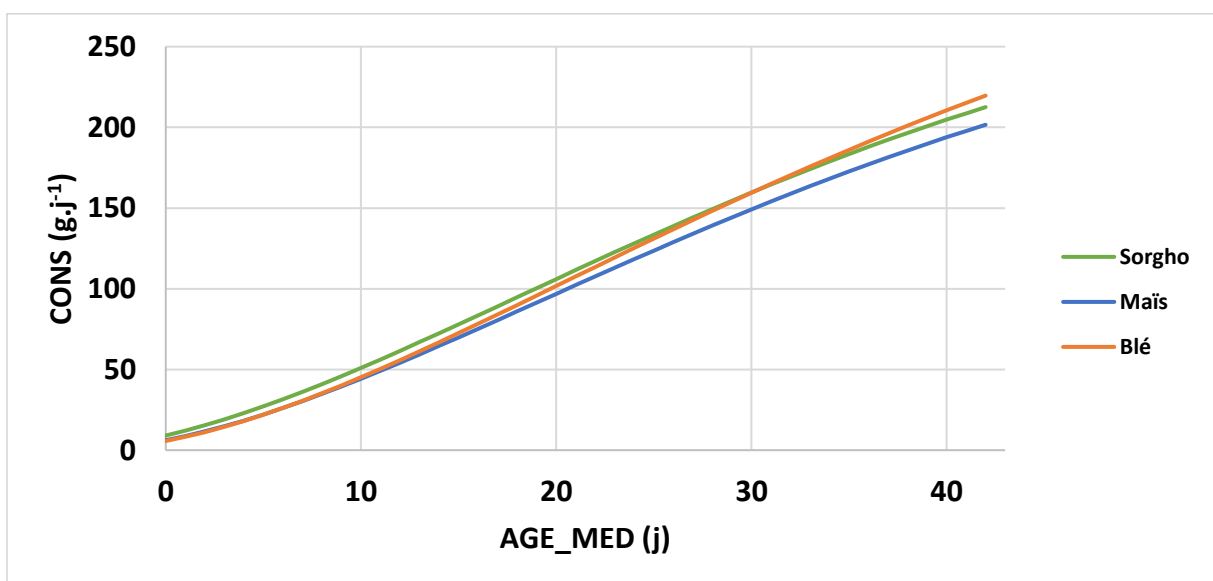


Figure 1.12. Effet de la source énergétique sur la consommation alimentaire des poulets.

Il existe de plus une interaction entre la part de blé et de maïs dans la ration, qui diminue $\sqrt{\text{CONS}}$ de 0.00052 g par point de blé et par point de maïs, rendant l'accroissement de la consommation en fonction de la part de blé ou de maïs plus faible dans le cadre d'un régime comportant ces deux matières premières.

Conclusions sur la consommation alimentaire

La consommation alimentaire est principalement sensible à la vitesse de croissance des animaux, l'évolution des deux caractères étant parallèle. La présence d'une interaction croisée entre la vitesse de croissance et le taux protéique conduit à un écart de consommation important entre régimes à taux protéique moyen ou élevé dans les souches à croissance modérée et lente.

L'influence de la composition des régimes sur la consommation est principalement due à la céréale impliquée, les animaux nourris au blé ou au sorgho présentant une consommation plus élevée que ceux élevés au maïs.

2.3.3. Effets sur le poids vif et la vitesse de croissance

2.3.3.1. Effet du type d'animal

La

Figure 1.13a reprend les courbes de croissance des 3 catégories d'animaux, qui atteignent respectivement 2781 g à 42 jours (FAST), 3036 g à 56 jours (MID) et 2496 g à 82 jours (SLOW). Pour les premiers, l'âge d'abattage se situe alors que les animaux arrivent tout juste au point d'inflexion de la courbe de croissance, alors que pour les deux autres catégories, l'inflexion se situe 33 à 46 jours avant l'abattage (

Figure 1.13b). La principale interaction entre la vitesse de croissance des animaux et la composition du régime est due à une interaction entre le type d'animal et le taux protéique ou le pourcentage de soja sur le gain de poids. En effet, pour les types SLOW et les FAST, augmenter le taux protéique ou le pourcentage de soja augmente le gain de poids, de manière toutefois plus importante pour les SLOW. Chez les animaux MID en revanche, seule l'augmentation du pourcentage de soja amène un effet positif sur le gain de poids (Figure 1.14).

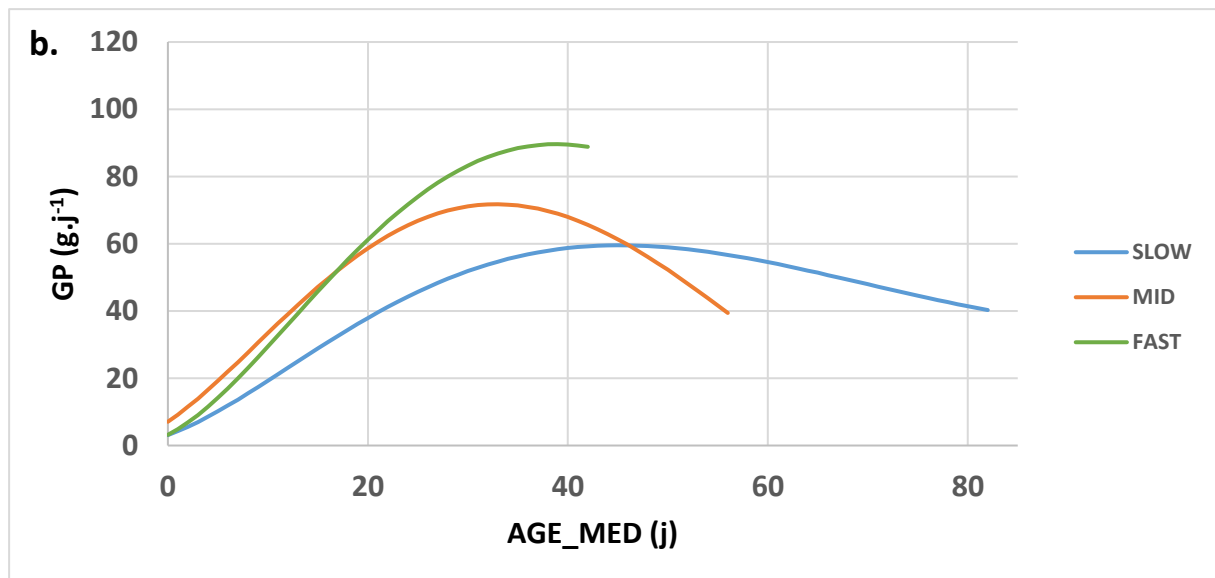
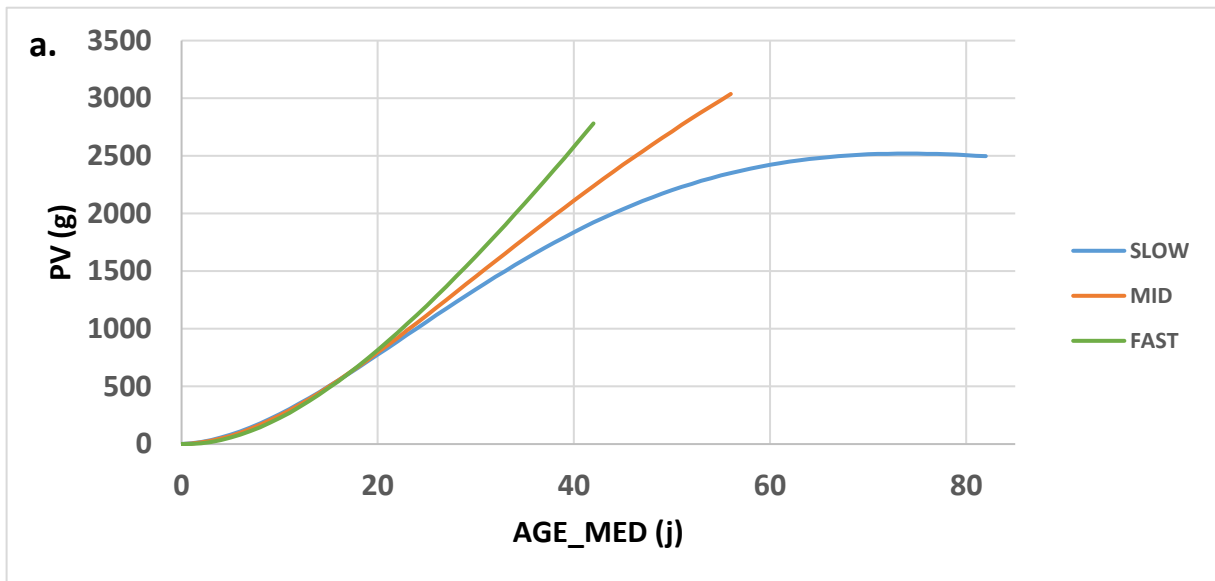


Figure 1.13. Effet du type d'animaux sur le poids vif (a) et le gain de poids (b)

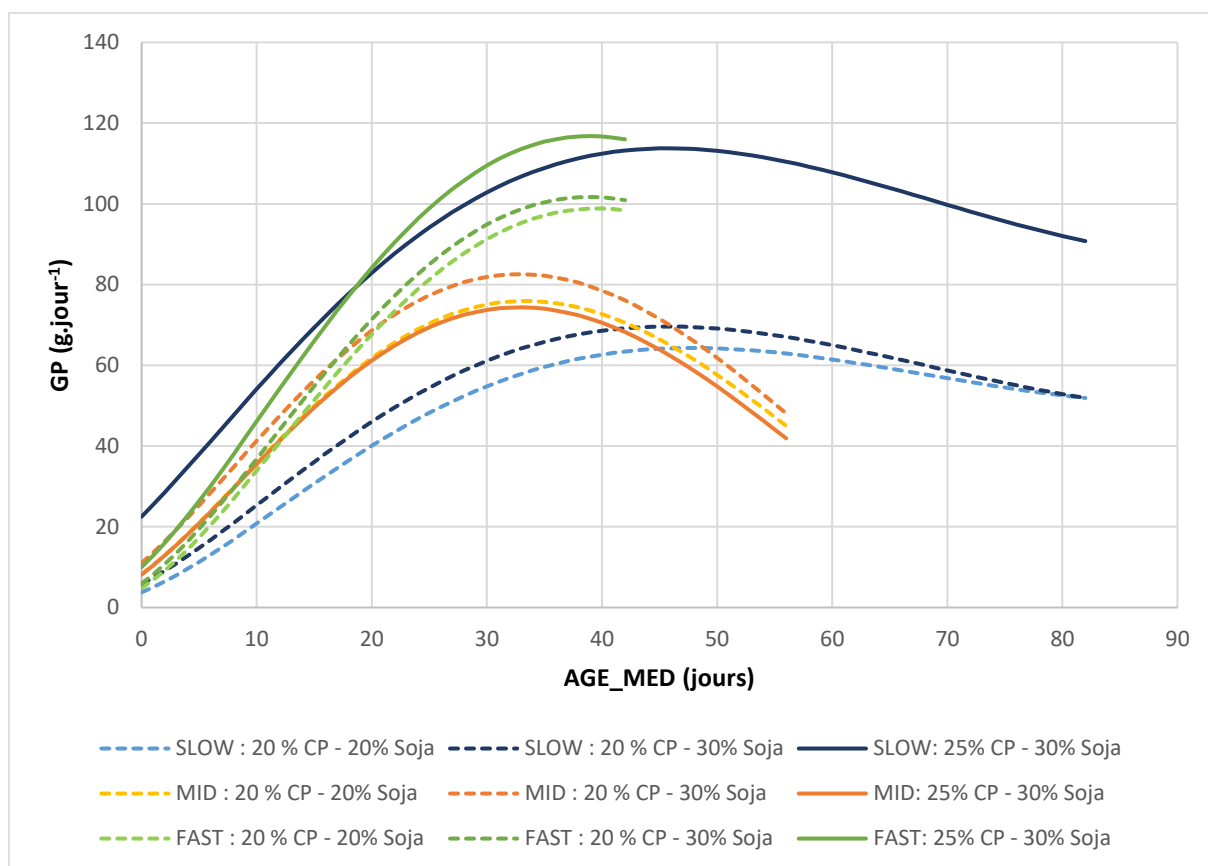


Figure 1.14. Interaction entre le type d'animal et le taux protéique ou le pourcentage de soja sur le gain de poids.

Poids vif (Figure 1.15a) et gain de poids (Figure 1.15b) présentent également une interaction de faible amplitude entre le type d'animal et le taux de blé dans la ration. Le poids vif et le gain de poids des animaux FAST sont très légèrement supérieurs avec 40% de blé qu'avec 30% de blé dans le régime (82 g et 5.6 g.j⁻¹ à 42 jours, respectivement). Les gains de poids des animaux MID et SLOW ne sont pas modifiés par le taux de blé, la différence entre 30 et 40% n'excédant pas 0.9 g.j⁻¹. Malgré cette absence d'effet du taux de blé sur la vitesse de croissance des animaux SLOW, on constate une légère baisse de poids pour les animaux nourris avec 40% de blé par rapport à ceux nourris avec 30% de blé (74 g à 12 semaines, Figure 1.15a).

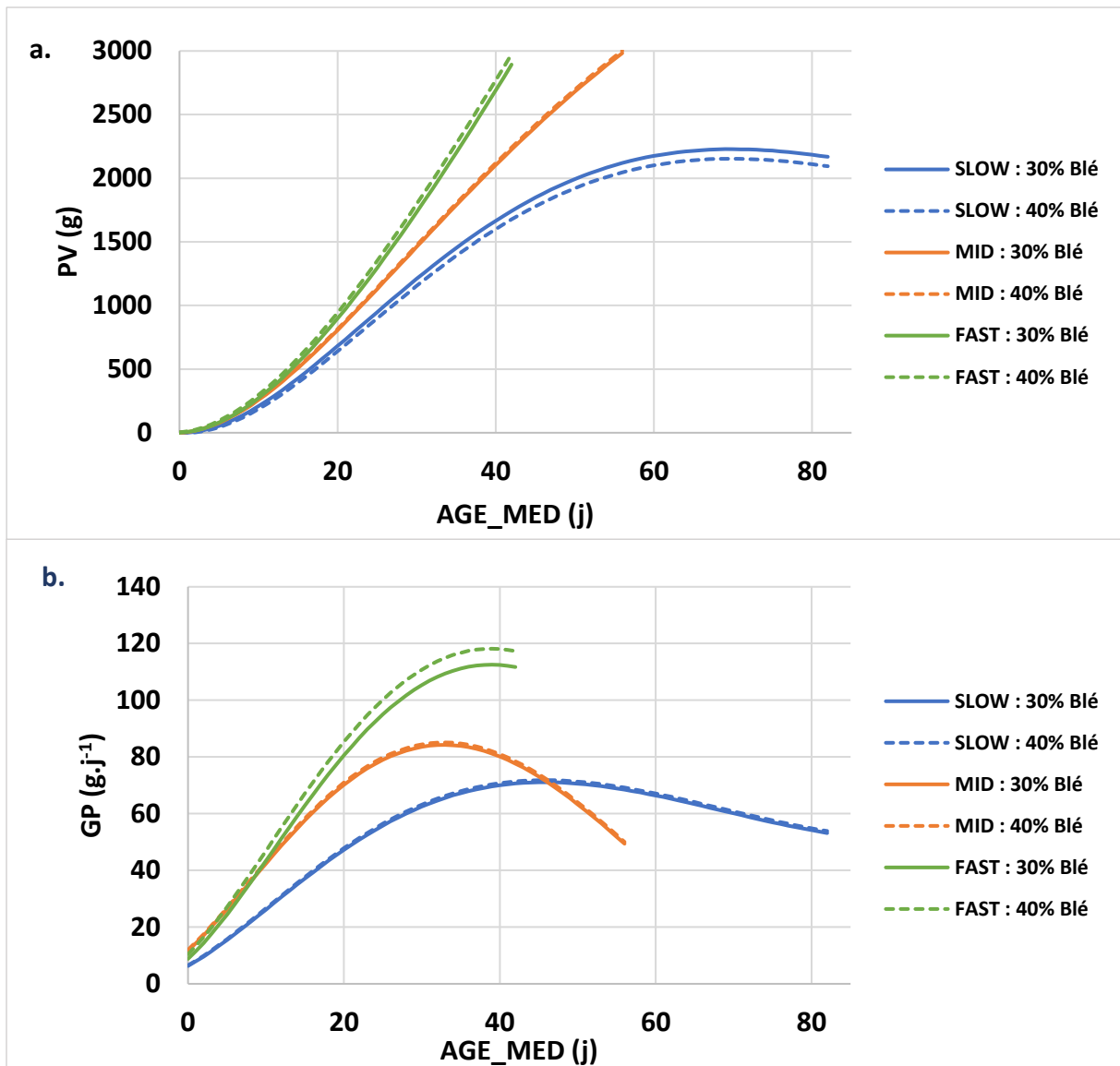


Figure 1.15. Interaction entre le type d'animal et le taux de blé dans la ration sur le poids vif (a) et le gain de poids (b)

2.3.3.2. Effet de la composition du régime

La matière protéique utilisée influence très modérément la vitesse de croissance, le soja amenant par exemple une vitesse de croissance légèrement plus élevée que le tournesol en tant qu'unique matière protéique du régime (+3.32 g.j⁻¹ en moyenne pour 20% de CP). L'effet qui influence le plus le gain de poids est l'interaction entre le type de matière première et le taux protéique de la ration. A taux protéique élevé, faire varier la proportion de soja ne change pas le gain de poids (Figure 1.16a), alors qu'augmenter la proportion du tournesol le diminue (Figure 1.16b). A l'inverse, à taux protéique faible, augmenter le taux de soja ou de tournesol permet d'augmenter la vitesse de croissance, avec un effet plus fort pour le tournesol. (Figure 1.16b).

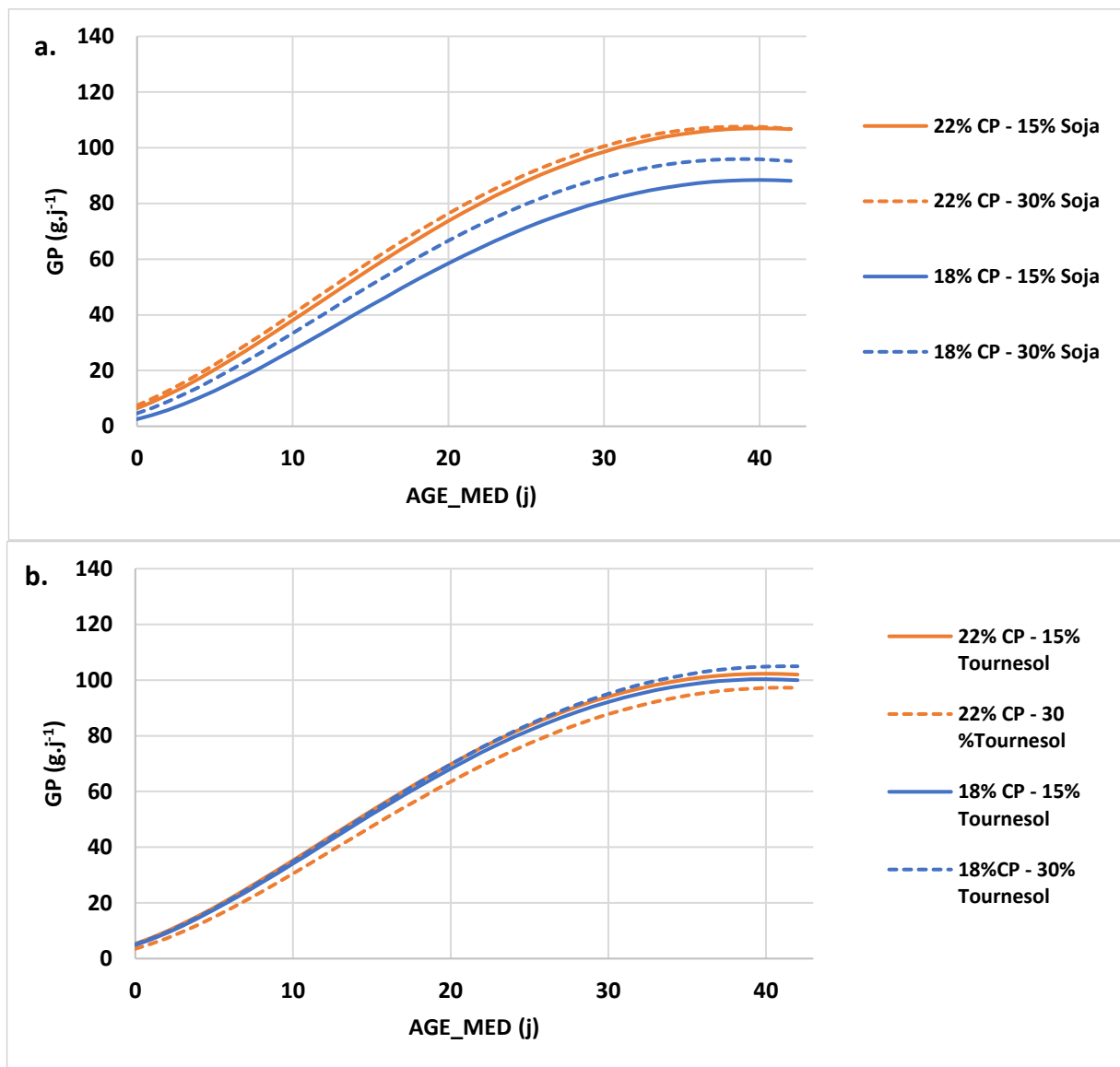


Figure 1.16. Interaction entre le taux protéique et le pourcentage de soja (a) ou de tournesol (b)

Les effets de la part énergétique de la ration sur le gain de poids proviennent essentiellement du blé, via un effet direct ou des interactions avec le taux protéique et le pourcentage de tournesol. Augmenter la part de blé de 30% à 50%, va augmenter le gain de poids entre 3.4 et 5.4 g.j-1 en début de croissance et entre 11.3 et 11.4 g.j-1 durant les 6 derniers jours de vie des animaux (Figure 1.17).

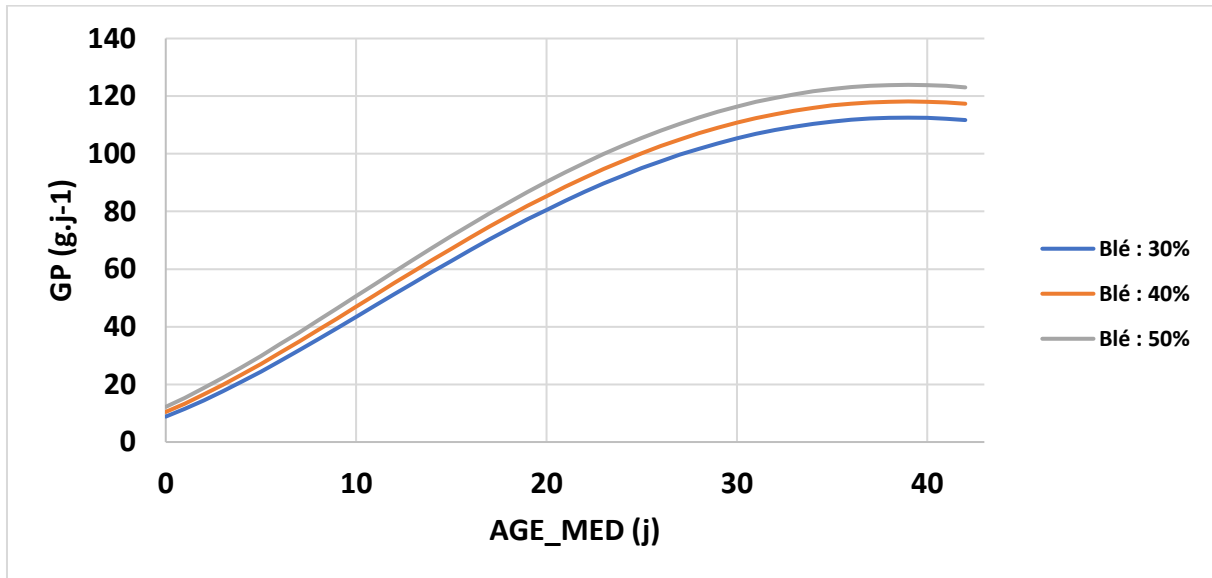


Figure 1.17.Effet du taux de blé sur le GP

L'interaction entre le taux protéique et le pourcentage de blé impacte la différence de GP quand on passe de 30 à 40% de blé dans la ration. En effet, à 18% de protéines dans la ration, passer de 30 à 40% de blé augmente le gain de poids à 42 jours de 6.9 g.j-1, alors que cette augmentation n'est que de 4.2 g.j-1 à 22% de CP (Figure 1.18). Enfin, on observe une interaction entre pourcentage de blé et de tournesol. Augmenter le pourcentage de tournesol va réduire le gain de poids plus fortement dans un régime à forte teneur en blé que dans un régime à faible teneur en blé (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

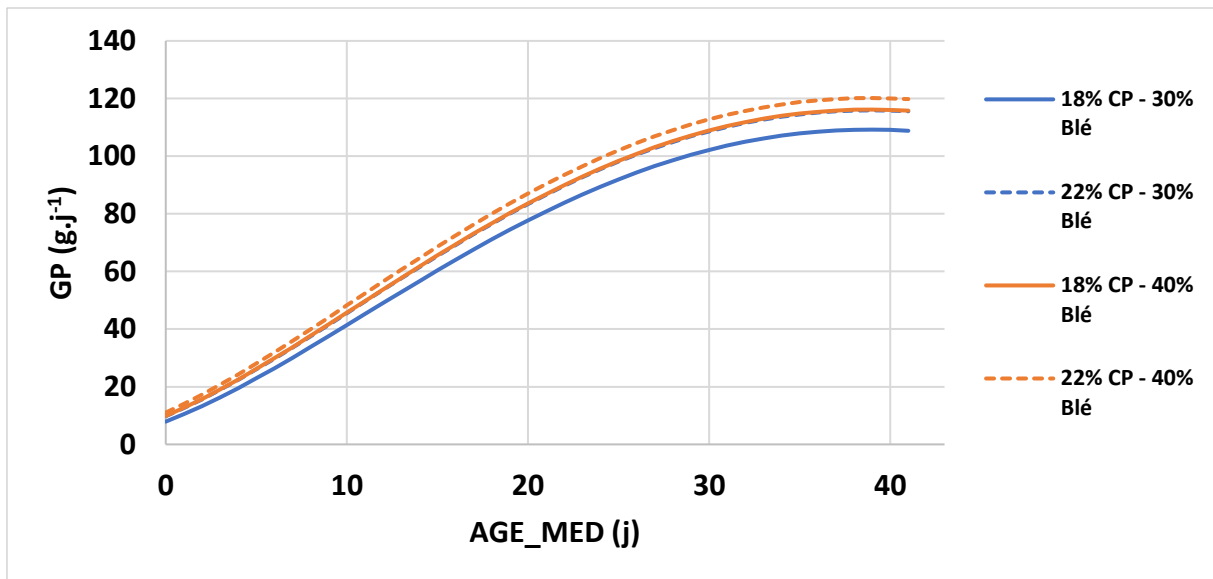


Figure 1.18. Interaction entre le taux protéique et le pourcentage de blé sur le gain de poids

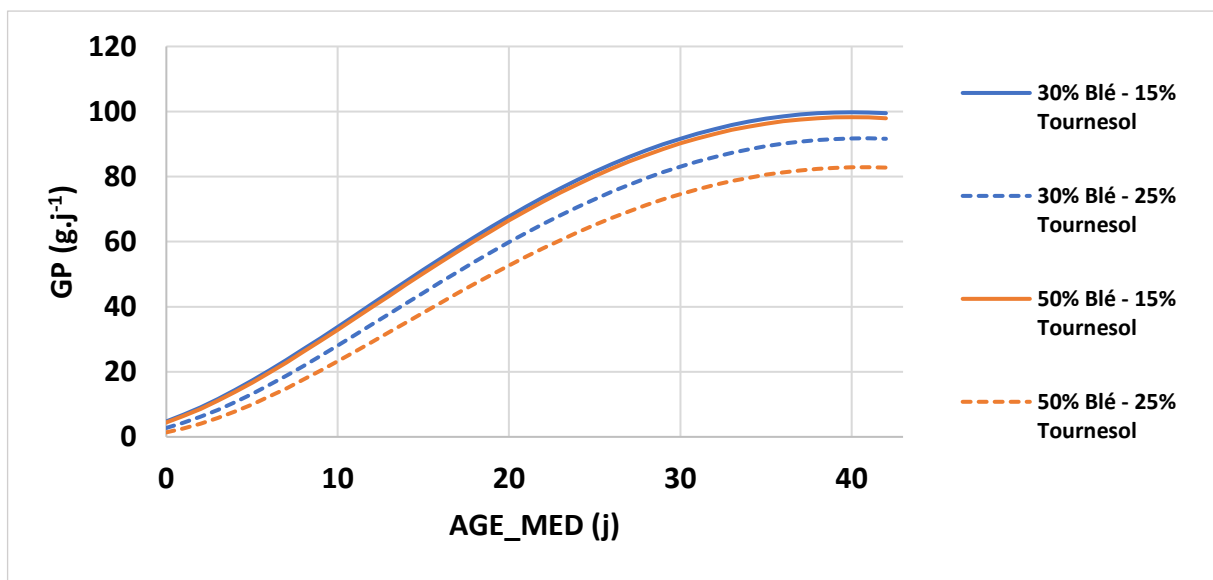


Figure 1.19. Interaction entre le pourcentage de blé et de tournesol dans la ration

Conclusions sur le poids et la vitesse de croissance

Le gain de poids est principalement impacté par le taux protéique de l'aliment, quelle que soit la matière première qui l'apporte. En général, augmenter le taux protéique amène à une augmentation du gain de poids, même si cela est à nuancer en fonction du type d'animal et des interactions entre certaines sources de protéines et d'énergie (blé×tournesol).

2.4. Discussion

2.4.1. Intérêts et limites de la méta-analyse

La plupart des études portant sur le remplacement du soja, du maïs ou du blé par d'autres matières premières moins utilisées ne prennent en compte qu'un seul génotype, un seul environnement d'étude et n'intègrent généralement que des animaux d'un seul sexe. Ajoutons à cela que ces études portent sur des périodes de temps (âge, durée) variables. Pour certaines, la période d'étude coïncide avec la totalité de la vie des animaux (Fries-Craft and Bobeck, 2019), pour d'autres simplement pour le régime de démarrage (Min et al., 2009), ou sur plusieurs phases de nutrition (Disetlhe et al., 2018). Or, les résultats de la méta-analyse nous montrent que les conclusions obtenues dans un contexte particulier ne sont pas facilement transposables dans un contexte différent, en particulier quand le facteur qui est modifié est la vitesse de croissance ou le mode d'élevage (cage, sol) des animaux. Cela explique également les difficultés à tirer des conclusions générales de l'observation séparée de chaque étude qui, pour une même matière première étudiée, peuvent apporter des conclusions contraires. Par exemple, dans des études avec des taux comparables d'intégration de tournesol dans les régimes avicoles (12-20%), on obtient un effet positif ou négatif sur l'indice de consommation entre des études menées sur des génotypes comparables mais à des âges différents (Mushtaq et al., 2009 ; Küçükyilmaz et al., 2014), à âge égal sur des génotypes différents (Taverni et al., 2008 ; Mushtaq et al., 2009), ou à génotype et âge égal, mais dans des conditions de mesures différentes (Berwanger et al., 2017 ; Chobanova et al., 2019).

La méta-analyse que nous avons menée a permis de synthétiser les effets des différentes matières premières pouvant être incluses dans le régime des poulets de chair en croissance en prenant en compte cette variabilité des conditions de mesure. Plusieurs points de vigilances sont cependant à signaler. Tout d'abord, le nombre d'études pour chaque catégorie est parfois peu important. Cela nous a amenés à définir les génotypes en fonction de leur vitesse de croissance moyenne et non par rapport à leur utilisation en production label ou standard, les études portant spécifiquement sur les poulets labels étant trop peu nombreuses. De plus, compte-tenu de la large plage de temps sur laquelle nous avons collecté les études (1970-2021), les animaux comme les matières premières ont évolué parfois de façon importante, ce qui peut également influencer les résultats. Enfin, pour comparer les effets respectifs des différentes matières premières sur les performances, nous avons effectué une simple substitution massive, c'est-à-dire que nous avons remplacé un certain pourcentage d'une matière première par le même pourcentage d'une autre matière première. Or, ces matières premières présentent des caractéristiques différentes (taux protéique, profils en acides aminés, taux de fibres) qui vont également changer les caractéristiques du régime. Pour être plus précis, il faudrait recalculer l'ensemble des caractéristiques des régimes avant et après substitution des matières premières.

2.4.2. Effet de l'environnement de mesure des performances

De cette méta-analyse ressort l'importance de prendre en compte l'environnement dans lequel on mesure les performances. En effet, l'activité des animaux élevés au sol est plus importante et pourrait être une explication de leur indice de consommation plus élevé (Ozhan et al., 2016). En cage, la faible activité des animaux entraîne une moindre dépense énergétique pour la locomotion. La compétition pour accéder à l'aliment quand les animaux sont élevés au sol pourrait également expliquer la meilleure efficacité en cage (Li et al., 2021). En effet, en cage, les animaux ne subissent pas la compétition et peuvent manger autant qu'ils le veulent, d'où la plus importante consommation que l'on retrouve en fin de croissance par les différents types d'animaux, par rapport à celle obtenue au sol (de 2.3% à 13.7% plus importante, en fonction de la vitesse de croissance). L'effet du mode d'élevage est plus important pour les animaux à croissance rapide. Cela pourrait être dû au fait que ces animaux ont pendant longtemps été sélectionnés sur leur efficacité alimentaire en cage (Siegel et al., 2008). Dans ce milieu, ces animaux exprimeraient donc pleinement leur potentiel génétique d'efficacité alimentaire.

2.4.3. Effet de la composition du régime

La variation du taux protéique de l'aliment est l'un des facteurs qui affecte le plus l'indice de consommation. Un accroissement de ce taux améliore l'indice, principalement par une amélioration du gain de poids. Cette amélioration provient vraisemblablement de l'apport plus important de lysine dans la ration qui favorise le dépôt de muscles et diminue celui de tissu adipeux (Lessire et al., 2013). Cette conclusion est toutefois à nuancer en fonction de la vitesse de croissance des animaux. En effet, la diminution est la plus importante chez les SLOW. Ceci pourrait provenir de l'absence de sélection sur le poids vif et le rendement en filet de ces animaux, ce qui donnerait à l'alimentation un rôle proportionnellement plus important dans la mise en place des performances. Pour les animaux MID, qui présentent la diminution de l'indice la moins importante, le gain de poids et la consommation diminuent tous les deux avec l'accroissement du taux protéique, la diminution étant plus importante pour la consommation. Cette réponse pourrait être expliquée par le fait que même avec une consommation modérée, les besoins protéiques des animaux sont couverts, mais pas les besoins énergétiques. Ce potentiel déficit énergétique pourrait alors expliquer que la croissance attendue ne soit pas atteinte. Il est intéressant de noter que l'accroissement du gain de poids avec le CP est plus faible dans un régime à base de blé que dans un régime à base de maïs. Cela pourrait être lié au fait que le blé est plus riche que le maïs en protéines (12.6% CP vs 8.8% CP), en lysine (3.0 g.kg⁻¹ MS vs 2.2 g.kg⁻¹ MS) et en méthionine et cystéine (4.4 g.kg⁻¹ MS vs 3.7 g.kg⁻¹ MS).

A faible taux protéique, l'augmentation du taux de blé augmenterait donc plus fortement la teneur du régime dans ces éléments essentiels pour la croissance des animaux et leur emplumement (Kalinowski et al, 2003 ; Lessire et al., 2013). A taux protéique élevé en revanche, les besoins en acides aminés sont déjà couverts et le gain que l'on peut attendre d'un apport supplémentaire est plus réduit.

Au-delà du taux protéique, le type de tourteau protéique utilisé (soja, colza, tournesol) influence également les réponses des animaux. Le soja est la meilleure source de protéines du fait de son taux protéique élevé (52.6% de la matière sèche), son faible taux de fibres (6.8%) et son profil d'acides aminés avantageux (lysine = 28.0 g.kg⁻¹ MS ; méthionine + cystéine = 12.9 g.kg⁻¹ MS) (*Tables de composition et de valeur nutritionnelle des aliments pour animaux INRA CIRAD AFZ*, 2021). L'indice de consommation est donc naturellement plus élevé avec le tourteau de colza et de tournesol, moins riches que le soja en protéines (30.7% pour le tournesol, 38.1% pour le colza) et en acides aminés limitants (8.6 à 15.9 g/kg MS pour la lysine, 9.7 à 12.0 g/kg MS pour la méthionine + cystéine). La relative meilleure efficacité alimentaire du tournesol par rapport au colza pourrait quant à elle s'expliquer par la richesse en fibres du tournesol (29.5% MS contre 14.3% MS pour le colza). Cette richesse en fibres pourrait induire un développement plus important du gésier et du proventricule en début de croissance (Jiménez-Moreno et al., 2009) et une hauteur des villosités du tube digestif plus importante (Sklan et al., 2003 ; Sadeghi et al., 2015). Ces modifications du tractus pourraient permettre une meilleure accessibilité et captation des nutriments au cours de la digestion, et donc une meilleure efficacité alimentaire.

En ce qui concerne la céréale utilisée comme source d'énergie principale du régime, l'impact le plus fort sur l'indice de consommation est dû à l'antagonisme des réponses observées suite à une augmentation du taux de maïs ou de blé dans la ration, le maïs induisant une plus faible consommation en fin de croissance pour une moindre efficacité tandis que le blé accroît la consommation des animaux tout en induisant meilleur gain de poids, sans modifier l'efficacité des animaux. Entre ces deux matières premières, il existe une différence de ratio entre énergie et protéines (1.70 pour le maïs, 1.09 pour le blé), car les deux céréales présentent des EMAn comparables, mais des taux protéiques différents. Une substitution massive du blé par du maïs va donc proportionnellement augmenter légèrement l'énergie de la ration tout en réduisant le taux protéique. Le profil des acides aminés sera également modifié, le maïs contenant moins de lysine, méthionine et cystéine et plus de thréonine que le blé (*Tables de composition et de valeur nutritionnelle des aliments pour animaux INRA CIRAD AFZ*, 2021). L'absence de réel impact sur les autres performances que l'indice peut laisser à penser que deux stratégies ont été mises en place par les animaux pour lesquels on substitue du maïs au blé. Certains doivent compenser cette baisse de protéines par une augmentation de la consommation, qui induit un surplus d'énergie, induisant un dépôt de gras abdominal plus

important (Kubena et al., 1974), et diminuant au final l'efficacité. D'autres maintiennent leur consommation au même niveau mais avec une croissance plus faible.

Conclusion

L'utilisation des matières premières alternatives au soja et au maïs semble être possible au vu des résultats de cette méta-analyse, même à des taux d'incorporation relativement élevés. Les modifications de performances observées étant majoritairement dues à un déséquilibre entre énergie et protéines et à une variation du profil d'acides aminés modifié, une supplémentation ciblée devrait permettre de compenser les écarts à la protéine idéale de régimes contenant plus de matières premières alternatives. Le point de vigilance principal porte sur la richesse en fibres des matières premières alternatives. Si celles-ci peuvent avoir des effets bénéfiques, elles peuvent, à fort taux protéique présenter un effet délétère sur l'absorption des protéines.

CHAPITRE 2 : Les automates de phénotypage de la consommation alimentaire des volailles

Les différences de consommation, de gain de poids et d'efficacité alimentaire, varient en fonction de la souche de poulet utilisée mais aussi de l'environnement d'étude. Il a été montré que, lorsque les environnements de production et de sélection diffèrent fortement comme par exemple en poulet label, cela génère d'importantes interactions entre génotype et environnement (N'Dri et al., 2007). Cela modifie le choix des critères de sélection de l'efficacité alimentaire selon le milieu et perturbe fortement le classement des candidats à la sélection (Mignon-Grasteau, 2007). Afin de s'assurer que les recherches expérimentales aboutissent à des résultats pertinents en termes d'application, il est donc primordial que les conditions expérimentales se rapprochent au maximum des conditions de production. Une première alternative au placement des animaux en cage individuelle est une expérimentation en parquets. Toutefois, la puissance statistique d'un tel dispositif expérimental est faible, l'unité statistique étant le parquet et non l'individu. On peut par exemple comparer la puissance d'un dispositif avec 40 individus répartis en 4 parquets de 10 animaux ou avec 40 données individuelles (effectif que nous avons utilisé pour la 1^{ère} expérience). Pour cela, considérons des valeurs de référence de la bibliographie, comme l'indice de consommation sur l'ensemble du cycle de production en poulets labels (3.61 ± 0.73 , N'Dri et al., 2007) et en poulets standards (1.46 ± 0.07 , Jones et al., 2020). On peut ensuite calculer quelle différence peut être détectée avec une puissance de 80%. Sur la base de ces éléments, il est possible de détecter une différence d'indice entre conditions de 3% en poulets standards et 13% en poulets labels avec 40 données individuelles, alors qu'avec 4 parquets de 10 individus, on ne détecte ces différences que si elles sont supérieures à 13% en poulets standards et 41% en poulets labels. Ces limites de puissance amènent à augmenter la taille des dispositifs en parquets, au détriment de l'un des principes de la règle des 3R. Par ailleurs, le fait d'obtenir une seule donnée par parquet ne permet pas de prendre en compte la variabilité de réponse intra-groupe à un challenge, alors même que l'homogénéité des performances au sein du groupe est un critère important de qualité du lot. Enfin, au-delà des difficultés de mesure de la consommation alimentaire, le calcul de l'indice implique aussi la mesure du poids qui nécessite de manipuler les animaux et ne peut donc être trop fréquent pour ne pas les stresser (Bellamy et Leonard, 1965). De ce fait, le nombre de données d'efficacité alimentaire qui peut être acquis est faible, de l'ordre au maximum d'une donnée par animal et par semaine.

Cette problématique a amené différentes équipes à développer des outils pour automatiser les mesures de consommation alimentaire et de poids en essayant de se rapprocher des

conditions de production (Tableau 2.1). Au fur et à mesure du perfectionnement des prototypes, il a été possible d'étudier également le comportement alimentaire de manière individuelle sans avoir recours à une force de travail trop importante (Xin et al., 1993). Ce chapitre bibliographique reviendra sur l'historique de mise au point et les spécificités d'utilisation des différents systèmes de mesure de la consommation alimentaire chez les volailles, avant de présenter les résultats obtenus sur les comportements et l'efficacité alimentaire ainsi que leur déterminisme génétique.

1. Du groupe à l'individu

1.1. Les premiers automates en volaille

Déjà utilisés dans les études sur la consommation des rats depuis 1963 (Pokrovsky et Le Magnen, 1963; Fallon, 1965), les premiers automates de consommation sont apparus en volailles sous l'impulsion de Bailey et Siegel en 1984. Ils ont adapté des cages d'isolement de Drury et al. (1969) en y ajoutant des pesons mesurant le poids d'aliment dans les mangeoires, la consommation d'eau et le poids de ce qui se trouve sur le sol de la cage. Grâce à ces éléments, ils ont pu obtenir la consommation alimentaire et le gain de poids de 36 poulets de 8 jours (Bailey and Siegel, 1984). Le système permettait également d'avoir un suivi heure par heure des différents caractères mesurés. Ces mesures demeuraient néanmoins obtenues dans des cages, en outre de très faible dimension (0.02 m² par animal), restreignant ainsi les mouvements des animaux et affectant fortement leur bien-être. Un système similaire a été développé par Puma et al. (2001) pour mesurer la consommation d'eau, d'aliment et le poids des animaux. La remontée des données était continue, ce qui permettait d'obtenir des données au niveau du repas. L'analyse détaillée des données a aussi permis l'exploration du comportement alimentaire de 24 animaux de manière fine (temps passé pour chaque repas, consommation pour chaque repas, consommation d'eau par buvée, etc.).

En parallèle, Lott et al. (1992) ont présenté des mesures automatisées du poids, de la consommation d'aliment et d'eau de poulets élevés au sol. Dans ce système de mesure, la mangeoire et l'abreuvoir étaient positionnés au centre de la zone de vie d'un groupe de 25 animaux, tous deux reliés à un peson faisant remonter un poids toutes les 30 min. A plus grande échelle, Xin et al. (1993) ont développé un système de mesure de l'eau et de l'aliment dans les silos, permettant un suivi de la consommation de quatre lots de 18800 animaux avec une fréquence de 2 minutes, en conditions réelles de production. Cependant, faute d'identification électronique, les données collectées dans ces deux systèmes étaient obtenues au niveau du groupe et non de l'individu.

Tableau 2.1. Caractéristiques des automates de phénotypage de la consommation alimentaire des volailles.

Auteur	Année	Automate	Environnement	Nb d'animaux par unité	Niveau de mesure	Consommation alimentaire	Poids des animaux	Consommation d'eau	Age de mesure	Fréquence de collecte des données	Pas de temps des résultats présentés	Design emprunté de
Bailey et Siegel	1984	18	Cages individuelles	1 poulet	Individuel	oui	oui	oui	8 jours	Heure	Heure	x
Lott et al.	1992	1	Sol	25 poulets	Collectif	oui	oui	oui	x	Demi-heure	Demi-Heure	x
Xin et al.	1993	4	Ferme	~19000 poulets	Collectif	oui	non	oui	40-56 jours	2 minutes	Heure	x
Yo et al.	1997	8	Cages collectives	4 poulets	Individuel	oui	non	non	16-21 jours	0.1 seconde	Seconde Période de mesure	x
Puma et al.	2001	24	Cages individuelles	1 poulet	Individuel	oui	non	oui	28-41 jours	30 secondes	Seconde Minute Jour	x
Bley et Bessei	2008	53	Sol	10 canards	Individuel	oui	non	non	14-49 jours	Repas	Jour Semaine	x
Gates et Xin	2008	24	Cages individuelles	1 poulet	Individuel	oui	oui	non	>28 jours	4 Secondes	Seconde	Puma et al., 2001
Howie et al.	2009, 2010, 2011	8	Sol	14.5 poulets	Individuel	oui	non	non	14-35	Repas	Semaine	Bley et Bessei, 2008
Tu et al.	2011	2	Sol	10 dindes	Individuel	oui	oui	non	15-18 semaines	0.5 seconde	Seconde Heure Jour Semaine	X
Basso et al.	2014	1	Sol	19 canards	Individuel	oui	non	non	6-56 jours	Repas	Jour Semaine	Bley et Bessei, 2008
Roy et Sarkar	2016	1	x	x	Individuel	oui	oui	non	x	Repas	x	x
Zuidhof et al.	2017	1	Sol	40 poulets	Individuel	oui	oui	non	35-140 jours	Repas	Jour Semaine	x
Xu et al;	2016	102	Sol	11.3 -18 poulets	Individuel	oui	oui	non	44-115 jours	Repas	Jour Période de mesure	x
Yi et al.	2018											
Wen et al.	2018	30	Sol	7.5 poulets	Individuel	oui	non	non	56-76 jours	1 seconde	Jour Période de mesure	Howie et al., 2009
Li et al.	2019	2	Sol	60 poulets	Individuel	non	non	non	> 28 jours	Repas	x	x
Yan et al.	2019	32	Sol	10.6 poulets	Individuel	oui	non	non	55-77 jours	Repas	Jour Période de mesure	Bley et Bessei, 2008

1.2. Le problème de l'individualisation des données

L'obtention de données au niveau individuel implique tout d'abord de s'assurer qu'un seul animal consomme l'aliment au moment de l'enregistrement puis d'attribuer la consommation à cet animal. Plusieurs stratégies ont été utilisées pour cela.

Le système en cage collective de 4 animaux de Yo et al. (1997) reposait sur une séparation physique entre la zone d'alimentation et la zone de repos permettant d'isoler l'animal qui mangeait de ses congénères. Le programme de calcul de consommation était prévu pour fournir une donnée au niveau du repas. Toutefois, la consommation alimentaire et les comportements autour de la mangeoire ne pouvaient pas être imputés à chaque animal, faute d'identification électronique. Le principe de l'isolement de l'animal au moment où il va s'alimenter est général dans tous les systèmes développés jusqu'ici. Cela se fait en obligeant l'animal à passer par un couloir étroit pour accéder à l'aliment, ce qui empêche l'arrivée d'animaux par les côtés ou l'arrière (Bley and Bessei, 2008; Howie et al., 2009; Tu et al., 2011; Basso et al., 2014; Yi et al., 2018; Wen et al., 2018; Li et al., 2019). Certains systèmes comportent également une porte ou un clapet à l'extrémité du couloir, qui se referme derrière l'animal qui vient d'entrer dans le système (Roy and Sarkar, 2016; Zuidhof et al., 2017; Yan et al., 2019). Basso et al. (2014) ont montré que l'utilisation du couloir permet de faire quasiment disparaître les doubles visites (2% à 14 j., 0.07% de 16 j. à 5 sem.).

Ce type de système présente néanmoins l'inconvénient d'imposer le passage par un couloir ce qui peut stresser les animaux et bloquer l'accès à l'aliment si un animal se couche dans le couloir. Pour résoudre ce problème Basso et al. (2014) ont ajouté une barre métallique dans le couloir d'accès à la mangeoire qui empêche les animaux de se coucher. Le système de Zuidhof et al. (2017) expulse quant à lui automatiquement les animaux s'ils restent trop longtemps dans le couloir d'accès à la mangeoire. Cependant, le couloir et l'isolement séparent les animaux pendant la consommation, ce qui ne permet pas l'expression naturelle des comportements sociaux au moment de l'alimentation. Les poulets ont en effet un comportement alimentaire naturellement grégaire et sont attirés vers la mangeoire lorsqu'ils voient d'autres animaux manger, ce qui n'est pas le cas dans certains dispositifs avec couloir (Li et al., 2021).

L'utilisation de puces RFID, seules ou couplées à un autre système de détection, a permis de résoudre la question de l'identification individuelle des animaux. Il a par exemple été utilisé chez le canard par Bley and Bessei (2008). Dans ce système, l'animal accède à l'aliment en passant dans un couloir qui garantit la présence d'un seul animal dans le dispositif. Le passage de l'animal dans le couloir est détecté par une cellule photoélectrique, qui déclenche la pesée de l'aliment à l'arrivée et au départ de l'animal. L'identification de l'animal est réalisée par un couple antenne/puce RFID sur l'animal, au niveau de la mangeoire, ce qui permet donc d'obtenir des informations par repas sur des individus identifiés et au sol (Bley et Bessei, 2008). Un système similaire a ensuite été développé sur le canard par Basso et al. (2014). La détection

des animaux par les antennes n'est cependant pas totale, et 6 à 21% des visites ne peuvent être attribuées à un animal. Cela n'affecte cependant que modérément la consommation alimentaire calculée, car ces visites manquées sont pour la plupart des visites très courtes (environ 2 secondes) avec peu ou pas de consommation.

1.3. Age et fréquence de mesure des animaux

De par leur design, beaucoup de ces automates ont une adaptabilité limitée à la croissance des animaux. Certains ne peuvent pas être modifiés (Bley et Bessei, 2008; Tu et al., 2011; Zuidhof et al., 2017; Yi et al., 2018; Yan et al., 2019) tandis que d'autres présentent des parties amovibles/ajustables qui permettent d'agrandir la largeur du couloir d'accès ou l'orifice d'accès à l'aliment en fonction de la croissance des animaux (Howie et al., 2009; Basso et al., 2014; Wen et al., 2018). Cela limite les données qui peuvent être collectées sur de jeunes animaux. Basso et al. (2014) ont en effet montré que, même avec la taille minimale du couloir d'accès à l'aliment, le taux de doubles visites au démarrage était de 33%. De plus dans la même étude, le taux de visites qui ne pouvaient être attribuées à un animal était de 25%. Cela pourrait aussi provenir d'un manque d'adaptabilité du dispositif, car lorsque l'animal est petit, la puce RFID se retrouve relativement éloignée de l'antenne (si elle est fixe) et risque donc de ne pas être détectée. Enfin, mesurer poids et consommation d'animaux jeunes implique de disposer de balances précises, car la consommation alimentaire par visite des poussins est faible. Cela entraîne un surcoût important pour la fabrication de ces automates. La plupart des études s'appuyant sur ces automates ne présentent donc pas de résultats les premiers jours. La collecte de données commence entre 14 jours pour des poulets à croissance rapide (Bley et Bessei, 2008; Howie et al., 2009) et 35 à 55 jours pour des poulets à croissance plus lente (Yi et al., 2018; Wen et al., 2018; Yan et al., 2019). La collecte est même effectuée encore plus tardivement (18 semaines) pour le dispositif développé pour les dindes (Tu et al., 2011).

2. De l'intérêt des automates de phénotypage de la consommation

2.1. Facilitation de l'étude du comportement alimentaire

Hormis pour les tous premiers automates qui ne fournissaient que des données par heure ou demi-heure, l'ensemble des automates fournit les données de fréquentation en temps réel, permettant l'étude du comportement alimentaire.

La définition du repas est une étape préliminaire assez complexe. Au cours d'un même repas, l'animal peut en effet faire des pauses, partir brièvement de la mangeoire puis y revenir.

Avant l'arrivée des automates, la méthode de regroupement des visites en repas était obtenue sur la base d'observations préliminaires. Bokkers et Koene (2003) ont par exemple défini le repas comme la période entre le 1^{er} coup de bec à l'aliment et le moment où le poulet cesse de donner des coups de bec à l'aliment pendant 10 secondes. L'obtention de données très fréquentes grâce aux automates a permis d'utiliser des modèles pour déterminer si deux visites successives d'un animal appartiennent au même repas ou à deux repas successifs, à partir de la distribution des intervalles entre deux visites. L'hypothèse sous-jacente est que deux visites d'un même repas seront moins espacées que deux visites appartenant à deux repas différents. Dans ce cas, la distribution du logarithme de ces intervalles correspond à un mélange de deux lois normales (une de moyenne faible pour les intervalles intra-repas, une de moyenne élevée pour les intervalles entre repas) et la modélisation de ce mélange de distributions permet de déterminer la limite entre les deux distributions (Kyriazakis et Tolkamp, 2011). Howie et al. (2009) a ainsi appliqué ce modèle aux données de comportement alimentaire de 1058 animaux et montré sur quatre lignées différentes que la durée moyenne du repas se situait entre 5.7 et 7.4 minutes avec 1.3 à 2.4 minutes de pause par repas et que l'intervalle moyen entre deux repas se situait autour de 60 minutes dans les conditions étudiées (Figure 2.1). Howie et al. (2010) ont également montré une structure identique chez les canards et les dindes, chaque repas étant constitué en moyenne de 1.5 à 2.4 visites. Ces distributions ont également été utilisées pour prédire la probabilité de début d'un nouveau repas dans les 5 minutes en fonction du temps depuis la dernière visite de l'animal.

Tu et al. (2011) ont aussi utilisé les données instantanées de poids d'aliment dans la mangeoire et de poids de l'animal pour détecter les pauses que l'animal fait au sein d'un repas. En effet, quand l'animal picore, on observe de fortes fluctuations des pesons reliés à l'aliment. Lorsque l'animal fait une pause, les données fluctuent moins. Les pauses sont donc détectées lorsque la différence entre deux valeurs consécutives de poids d'aliment devient très faible pendant une période. Cela peut être confirmé par une interruption de l'arrivée de poids vif des animaux sur cette même période, ce qui correspond au fait qu'au moment de la pause, l'animal relève la tête et qu'il n'est plus détecté par l'antenne.

Les données de comportement autour de la mangeoire ont également été proposées comme potentiels indicateurs de la présence de grippe aviaire. Roy et Sarkar (2016) ont ainsi émis l'hypothèse que les animaux mettant plus de temps à arriver à la mangeoire ou mettant plus de temps à rejoindre la zone de repos après le repas seraient plus susceptibles d'être affectés, mais cette hypothèse n'était pas étayée par des résultats expérimentaux.

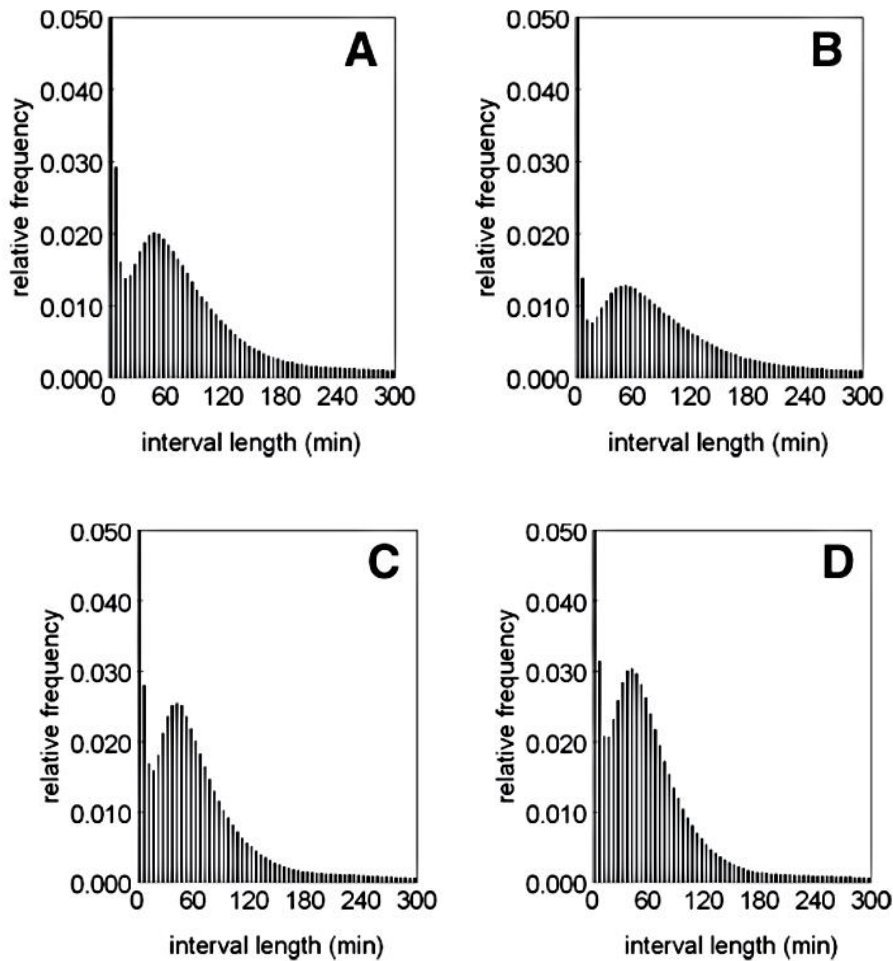


Figure 2.1. Distribution des intervalles entre visites pour 4 génotypes de poulets de chair (Howie et al., 2009).

2.2. Gestion de lot plus précise

La plupart des automates reposent sur une alimentation *ad libitum* et leur conception ne permet pas de limiter l'accès à l'aliment des animaux (Bley et Bessei, 2008; Roy et Sarkar, 2016; Wen et al., 2018). En revanche, les systèmes comprenant une porte permettent de restreindre l'alimentation des animaux. On peut alors l'utiliser, comme chez les porcs pour moduler les quantités distribuées en fonction de la courbe de poids à atteindre. Par exemple, l'automate de Zuidhof et al. (2017) a été utilisé pour ajuster le programme de restriction alimentaire de futurs reproducteurs pour s'ajuster au mieux à la croissance préconisée. Lorsque l'animal entre dans le couloir d'accès à la mangeoire, il est identifié et pesé. Si l'animal n'a pas dépassé le poids prévu, un repas de quantité prédéterminée lui est distribué. Dans le cas contraire, l'animal est expulsé doucement du système.

3. Déterminisme génétique des caractères de comportement et d'efficacité alimentaire

Parmi les études utilisant ces automates de consommation, nombreuses sont celles qui se limitent à des études phénotypiques, car les automates sont souvent dimensionnés pour accueillir une dizaine d'animaux et que seules quelques unités sont disponibles, limitant donc l'effectif total mesuré (Tu et al., 2011; Zuidhof et al., 2017; Yan et al., 2019).

Seules deux études sur le poulet rapportent des paramètres génétiques de comportement et d'efficacité alimentaire grâce à ces automates. Celle de Yi et al. (2018) porte sur des poulets à croissance lente entre 56 et 115 jours, alors que celle de Howie et al. (2011) porte sur des génotypes à croissance rapide, de 2 à 5 semaines. Dans les deux cas, malgré l'existence de données quotidiennes (*a minima* pour la consommation et le comportement alimentaires), seule une donnée compilée sur l'ensemble de la période d'élevage est étudiée.

Les estimations d'héritabilité de l'indice de consommation (0.29 à 0.45 en fonction du génotype), la consommation résiduelle (0.28), le poids et le gain de poids (0.20-0.38) et la consommation alimentaire (0.28-0.39) sont très comparables à ce que l'on trouve habituellement dans la littérature (Abasht et al., 2020).

Les estimations de paramètres génétiques des comportements alimentaires sont en revanche plus fréquents, puisqu'ils ne nécessitent pas l'enregistrement du poids des animaux. Dans différentes souches de poulets à croissance rapide, Howie et al. (2011) ont ainsi démontré l'existence d'un déterminisme génétique important pour différents caractères de comportement alimentaire tels que le nombre de repas par journée ($h^2 = 0.50-0.55$) ou la quantité ingérée par repas ($h^2 = 0.52-0.55$). Les autres caractères étudiés (durée des repas, temps de pause au sein des repas, nombre de visites par repas, durée quotidienne d'alimentation, pourcentage de temps du repas passé à se nourrir) présentaient des héritabilités moyennes entre 0.25 et 0.40. Ces différents caractères de comportement alimentaire semblent assez faiblement corrélés avec la consommation alimentaire et l'efficacité alimentaire. Par exemple, la corrélation génétique entre la consommation par repas et la consommation sur la période d'étude varie de 0.15 à 0.25 et celle entre la consommation par repas et l'indice de consommation par période est de 0.23 à 0.27. Cela suggère que les animaux peuvent atteindre des consommations ou des efficacités comparables avec des profils de comportement alimentaires différents.

Conclusion

Les différents automates mis au point depuis 1984 ont montré qu'il était possible d'obtenir des performances individuelles sur des volailles élevées au sol et en groupe. Ils ont permis de caractériser finement la consommation alimentaire et les comportements alimentaires. Plus rares ont été ceux qui, mesurant également la croissance, permettaient également de calculer directement l'efficacité alimentaire. La limitation de l'accès à l'aliment par un corridor ou une porte sont néanmoins des sources de perturbations du comportement des animaux. L'automate BIRD-e développé à BOA permet de résoudre ce problème en permettant la mesure du poids vif et de la consommation alimentaire des animaux élevés au sol et en groupe sans séparer les animaux par un couloir pour accéder à l'aliment. Les caractéristiques techniques de la mangeoire BIRD-E sont décrites dans un article du Cahier des Techniques de l'INRA (Guettier et al., 2020), auquel je suis associé (voir en annexe 3). L'automate permet une grande flexibilité des réglages (plateau de pesée des animaux, capots d'accès à l'aliment, hauteur de l'accès à l'aliment, position de l'antenne RFID par rapport à l'accès à l'aliment), ce qui rend possible l'enregistrement des données dès l'âge de 4-5 jours (Mika et al., 2021).

CHAPITRE 3 : Impact d'un régime alternatif au maïs-soja sur les performances de poulets à croissance lente ou rapide

D'après les résultats de la méta-analyse, maintenir ou améliorer l'efficacité alimentaire dans un contexte de diminution de la part de maïs et de soja au profit de matières premières plus locales n'apparaît pas simple. Les matières premières alternatives contiennent en effet des taux de fibres, notamment insolubles, et des facteurs antinutritionnels qui affectent négativement les performances. La présence d'interactions entre certaines matières premières telles que le blé et le tournesol indique qu'il est important de les prendre en compte simultanément, ce qui est rarement le cas dans les études qui cherchent à caractériser l'effet des matières premières séparément. De plus, les études montrent que l'effet du remplacement de ces matières premières est variable selon le génotype et semble affecter différemment les animaux à croissance rapide et ceux à croissance lente. Enfin, les résultats obtenus en cage et au sol diffèrent et il existe également une interaction entre la vitesse de croissance et le milieu de mesure. Il est donc particulièrement important de réaliser des études au sol afin que les résultats soient comparables avec les données que l'on obtiendrait dans les conditions de production.

Nous avons donc dans un premier temps caractérisé l'effet du remplacement du maïs et du soja par des matières premières locales dans deux génotypes de poulets à vitesse de croissance contrastée :

- en remplaçant maïs et soja par une combinaison de matières premières locales (tournesol, colza, féverolle, blé) et non par une seule matière première alternative, afin de se rapprocher de ce que l'on pourrait imaginer en production. Dans tous les cas, les régimes étaient adaptés aux besoins des animaux sur la période de distribution. Les régimes « classique » et « alternatif » étaient isoprotéiques et isoénergétiques, afin que l'effet étudié soit celui d'un changement de matières premières et non celui d'une variation du taux protéique ou du contenu énergétique de l'aliment.
- en étudiant à la fois des animaux à croissance rapide (Cobb 500) et des animaux Label rouge cou nu (SASSO T44N) pour prendre en compte la différence de sensibilité des génotypes

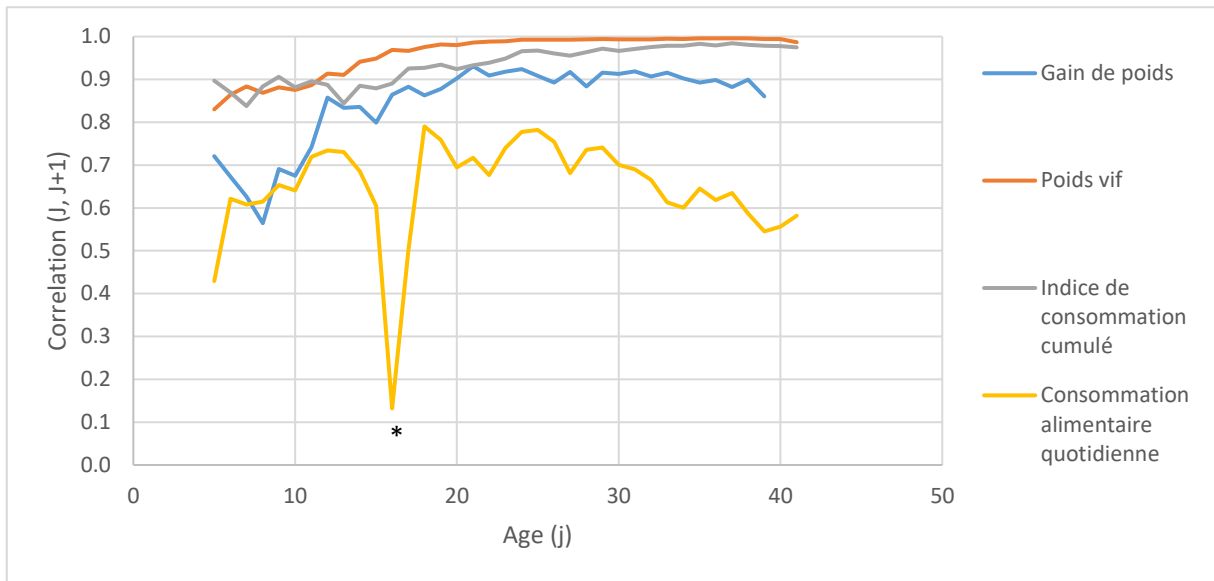
- en mesurant ces performances au sol, grâce au développement de l'automate Bird-e. Cet automate permet l'accès à l'aliment de 8 animaux en même temps sans isoler les animaux les uns des autres pour ne pas perturber leur comportement alimentaire. Il fournit simultanément la mesure du poids de l'animal et de l'aliment dans la mangeoire.

L'obtention des données quotidiennes de consommation alimentaire et de poids des animaux nous a permis d'étudier les différences de cinétiques d'efficacité alimentaire entre les groupes. *Deux stratégies d'étude des données quotidiennes étaient envisageables à partir de ces données :*

- la modélisation, au travers par exemple de régressions aléatoires, de paramètres résumant l'évolution des caractères au cours de la vie de l'animal
- l'étude des valeurs jour par jour.

Avec la stratégie des régressions aléatoires, on modélise l'évolution des données quotidiennes au moyen des polynômes de Legendre, et on résume l'information par un jeu de coefficients simples, mais sans signification biologique (Schaeffer, 2004). Cette stratégie permet de prendre en compte l'autocorrélation forte entre deux données successives. Par exemple, si l'on considère les données de consommation alimentaire et de poids vif collectées sur les animaux des lignées à fort ou faible pH ultime de la viande (étude des chapitres 4 et 5), l'autocorrélation entre deux mesures consécutives était de 0.6 pour la consommation alimentaire à près de 1 pour le poids vif (Figure 3.1). La modélisation de nos données d'indice de consommation avec une régression aléatoire fonctionne très bien lorsque le degré des polynômes est important. Par exemple, avec un polynôme de degré 8, la différence moyenne entre l'indice mesuré et l'indice estimé (en valeur absolue) n'est que de 0.8%. Cependant, lorsque l'on souhaite simplifier le modèle pour diminuer le nombre de paramètres à estimer, le lissage des courbes devient important et ne permet plus de suivre les changements qui pouvaient advenir entre deux jours successifs suite à un évènement particulier (par exemple, la réaction à un changement d'aliment, Figure 3.2).

3.1.a.



3.1.b.

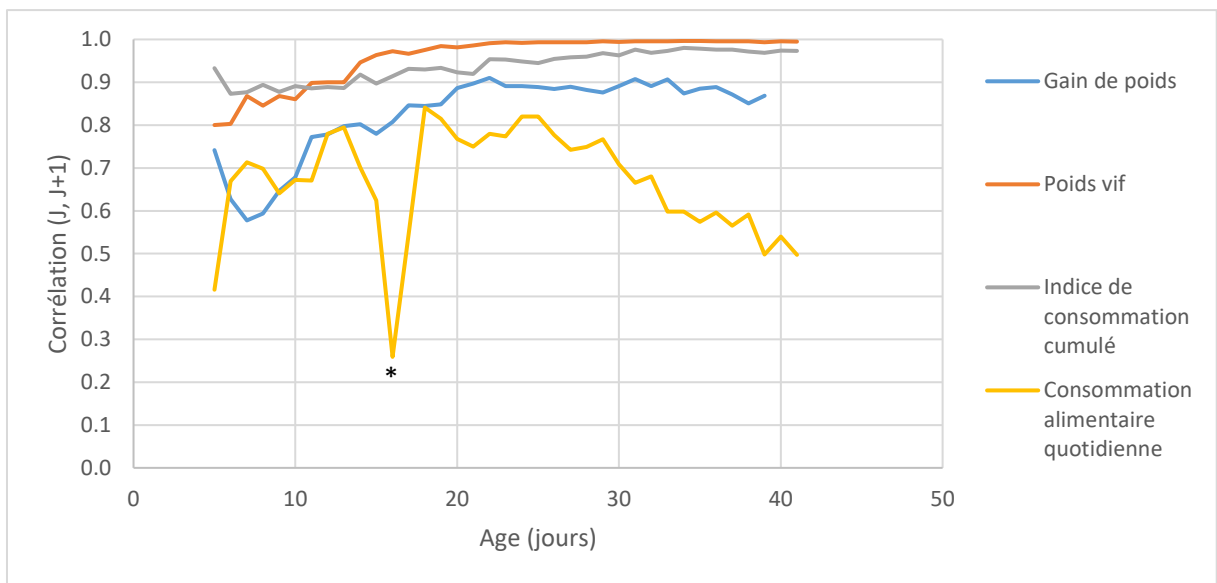


Figure 3.1. Corrélations phénotypiques entre jours successifs pour les différentes performances des animaux *pHu-* (a) et *pHu+* (b)

* : Performances modifiées par la prise de sang effectuée ce jour

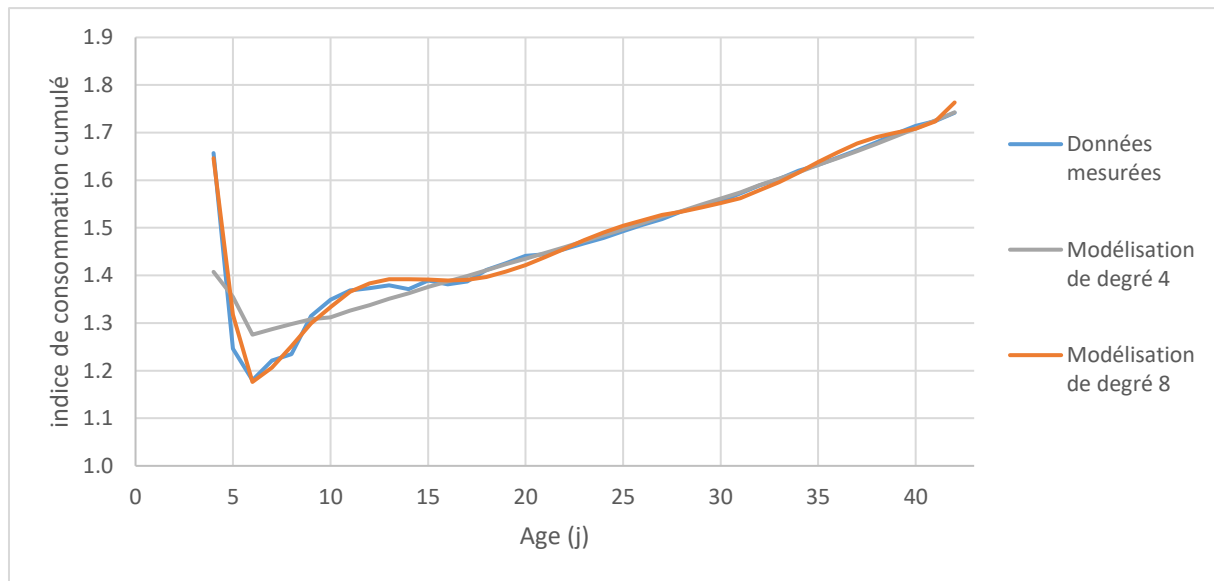


Figure 3.2. Modélisation de l'indice de consommation cumulé des animaux de la seconde étude (chapitres 4 et 5)

Ce lissage est observé à la fois sur les courbes phénotypiques et sur les cinétiques de paramètres génétiques. Lawlor et al. (2002) ont ainsi montré que les courbes d'évolution des paramètres génétiques fluctuaient beaucoup moins lorsque l'on utilisait des régressions aléatoires sur des données répétées. Or, l'un des objectifs de ce travail était de détecter des moments critiques de la vie de l'animal qui pourraient être ensuite utilisés en sélection. Nous avons donc retenu la seconde stratégie et étudié l'évolution quotidienne des performances. Cependant, les fluctuations quotidiennes du gain de poids et de la consommation alimentaire engendrent des fluctuations importantes entre 2 jours consécutifs sur l'efficacité alimentaire, sans que celles-ci aient véritablement une signification biologique. Nous avons donc pris en compte les données de plusieurs jours consécutifs pour calculer l'indice de consommation, pour limiter ces fluctuations excessives, sans pour autant faire disparaître les variations qui avaient un sens. C'est un calcul sur une base de 5 jours (du jour N-2 au jour N+2) qui a permis d'obtenir le meilleur compromis entre ces deux objectifs (Figure 3.3).

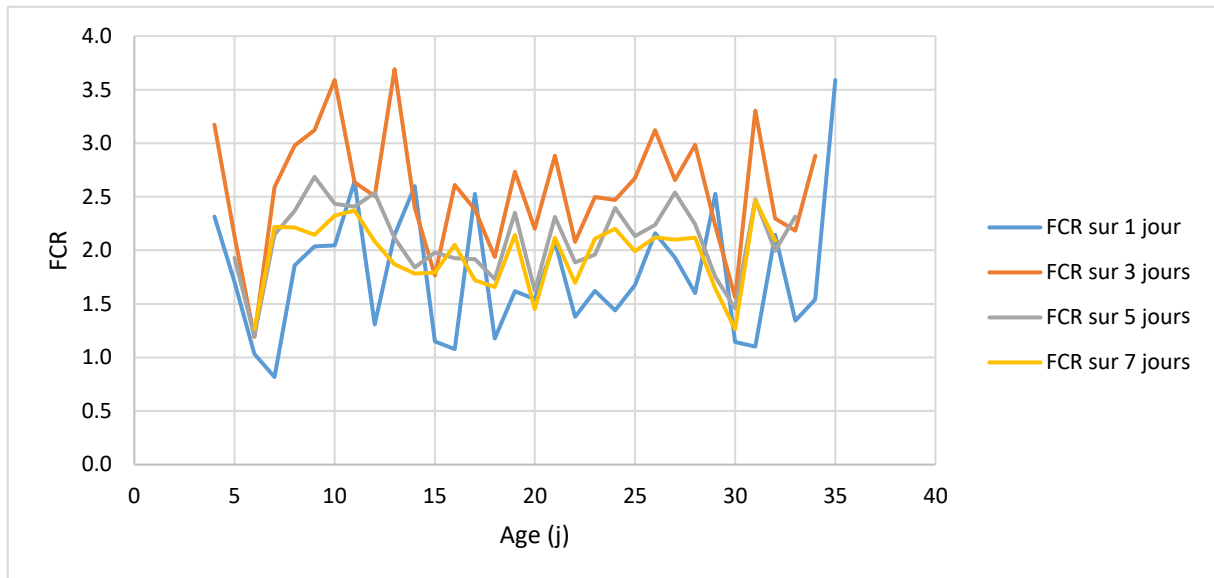


Figure 3.3. Variabilité de l'indice de consommation quotidien (FCR) en fonction du mode de calcul.

Au-delà de *l'impact du changement de régime sur les performances moyennes*, nous avons également observé *son impact sur l'homogénéité du groupe*. En effet, le système de contractualisation entre les éleveurs et les organismes de production prévoit une rémunération de l'éleveur au kg de poulet produit (Chenut et al., 2013 ; Magdelaine et al., 2015), avec un malus lorsque le poids des animaux s'éloigne trop de l'objectif. Si on recherche un poids cible de 2.0 kg avec une tolérance de 300 g, on pénalisera les animaux pesant moins de 1.7 kg ou plus de 2.3 kg. Lorsque le coefficient de variation du poids est de 10%, 13.4% des animaux vont être pénalisés. En revanche, si on a une plus forte hétérogénéité du troupeau et que le coefficient de variation du poids est de 20%, le taux d'animaux pénalisés sera de 45.3%, ce qui impactera fortement le revenu de l'éleveur.

Enfin, les corrélations phénotypiques ont été calculées entre les performances journalières et les performances obtenues à l'abattage. Ces corrélations ont permis *d'observer l'impact des régimes sur la construction des caractères d'intérêt en production et de mettre en avant des prédicteurs précoces* pouvant être utilisés en vue d'améliorer les rendements en viande et la qualité de cette dernière.

L'expérimentation était intégrée dans le projet européen H2020 Feed-a-Gene (2015-2020, numéro 633531) coordonné par Jaap van Milgen (INRAE, UMR PEGASE).

Les résultats de cette première expérience ont fait l'objet d'une publication dans Poultry Science (Berger et al., 2021) et d'une communication au symposium européen de génétique avicole à Prague (Berger et al., 2019).

ADAPTATION TO ALTERNATIVE DIETS IN BROILERS

The kinetics of growth, feed intake, and feed efficiency reveal a good capacity of adaptation of slow- and rapid-growing broilers to alternative diets

Quentin Berger¹, Elodie Guettier¹, Séverine Urvoix¹, Jérémy Bernard², Patrice Ganier²,
Marine Chahnamian², Elisabeth Le Bihan-Duval¹, Sandrine Mignon-Grasteau^{*,1}

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

² INRAE, PEAT, 37380 Nouzilly, France

*Corresponding author: Sandrine Mignon-Grasteau

Email: sandrine.grasteau@inrae.fr

Address: INRAE, Université de Tours, BOA, 37380 Nouzilly, France

Phone Number: +33247427691

Scientific section: Genetics and Genomics

ABSTRACT

Poultry production currently relies on the use of soybean as the main protein and energy source. Reducing its proportion in poultry diets and partly replacing it with local feedstuffs would improve sustainability by reducing dependence on importations and the environmental impact of production. In this study, we evaluated the impact of replacing soybean by sunflower meal, fava bean, canola meal, and dried distillers' grains with solubles on the performance of rapid- and slow-growing chickens. Animals were reared in groups and on the floor. Individual body weight and feed intake data were collected throughout each animal's life thanks to an electronic feed station. At 5 weeks (for broilers) and 12 weeks (for slow-growing chickens), the birds were slaughtered to obtain carcass composition and meat quality data.

Adaptation to an alternative diet was studied separately for each genotype. Firstly, we did ANOVA with diet effect on daily data of individual body weight, feed intake, and feed conversion ratio. Secondly, the variability of performances within the group was studied by ANOVA with effects of diet, period and their interaction. Finally, the correlations between daily performances and final performances at slaughter were calculated to understand the construction of final phenotypes and to identify early indicators of final performances.

The results first showed that the animals adapted well to the alternative diet, mean daily and final performances being mostly similar between the two diets for both genotypes (<3% on final BW). However, daily observations highlighted the critical importance of periods around dietary transitions by showing impacted performances for both genotypes. For example, FCR of LR-AD was 12 to 14% lower during the three days after transitions than during the three days before. It underlined the fact that adapting management of the batch to the alternative diet would be necessary. Correlations between daily and final performances showed that the slaughter performances of rapid-growing chickens were mostly determined by body weight whereas the main criterion was cumulative feed conversion for slow-growing chickens. These correlations also suggested that reserve making might be modified with the alternative diet, with rapid-growing chickens making more glycogen reserves and less fat reserves.

Key Words: alternative feedstuff, Radio frequency identification device, kinetics, feed efficiency, feed intake

INTRODUCTION

Nutrition represents 50 to 70% of the production costs in poultry production (van Horne, 2018). A large part of these costs comes from the reliance on soybean and cereals to feed animals, which often compete with human nutrition (Leinonen and Kyriazakis, 2016). In Europe, soybean is mostly imported from America (European Commission, 2019). Moreover, Lathuilière et al. (2017) reported that soybean is a major cause of deforestation in Brazil and that maize culture requires a large amount of water. There is thus a motivation to reduce the need of these two feedstuffs in poultry diets in order to ensure the sustainability of poultry

production in a context of growing world demand. Sunflower and rapeseed meals, by-products of oil industry and Dried Distillers Grains with Solubles (DDGS), by-product of bioethanol production, can be used as alternative sources of proteins. Moreover, their protein content varies according to the method of production (Laudadio et al., 2013). In order to compensate a potential lack of protein, other sources can be added to the diet, such as fava bean, a legume rich in protein with a sustainable worldwide production (Jensen et al., 2010). However, its incorporation is limited due to these beans' richness in protease inhibitors, lectins, phenolic compounds, saponins and non-starch polysaccharides that can affect the feed efficiency of the animals by impacting transit time, nutrient degradation or anatomy of the digestive tract for example (Diaz et al. 2006). It has been shown that replacing soybean by a unique feedstuff had negative consequences on performances. For example, replacing soybean by Fava bean led to low digestibility in methionine and cysteine (Koivunen et al., 2016). Regarding performances, replacing soybean by fava bean led to a decrease of 3% to 9% in BW with an increase of 5.7 to 8.0% of FCR in standard and Label Rouge chickens (Diaz et al., 2006; Bosco et al., 2013). Replacing it by DDGS improved BW by 2.1% to 3% without modifying FCR (Foltyn et al., 2013). Finally, replacing by canola meal increased FCR by 1% due to a 7.1% decrease of BW and DFI (Toghyani et al., 2016). Taking into account these results, one nutritional strategy could be using a mixture of these alternative feedstuffs (sunflower and canola meals, DDGS, fava beans) instead of a unique feedstuff assuming that the complementarity between feedstuffs and the limitation of the proportion of each anti-nutritional factor would favor bird adaptation.

We thus evaluated the ability to adapt of two genotypes with different levels of growth rates and nutritional requirements, i.e. rapid-growing standard chickens and slow-growing Label Rouge chickens. We compared the kinetics of mean body weight, feed intake, and feed efficiency, as well as the variability of these traits between the alternative and the control diet from hatch to slaughter. Finally, the analysis of the profiles of correlations between daily data and carcass and meat quality traits measured at slaughter was used to decipher how final phenotypes were constructed in both genotypes and diets and to find early predictors, other than morphological traits such as chick or chickens length and weight (Mendes et al., 2007; Moleenar et al., 2009). Measuring these traits in animals reared in individual cages induces a bias as it modifies animal feeding behavior and physical activity. Collective performances collected from birds reared in floor pens do not have this bias, but require a large number of animals for a rather poor statistical power (Gopinger et al., 2014; Alagawany et al., 2017). In order to be representative of production conditions (i.e. with animals reared on the floor and in groups), we thus collected individual feed intake and body weight data with an automaton developed in our lab.

Table 3.1. Composition and age of distribution of classical (CD) and alternative (AD) diets for Cobb 500 (STD) and Label Rouge (LR) genotypes

Ingredient (%)	STD						LR					
	CD			AD			CD			AD		
	1-7 d	8-22 d	23-35 d	1-7 d	8-22 d	23-35 d	1-28 d	29-63 d	64-82 d	1-28 d	29-63 d	64-82 d
Corn	30.650	35.970	39.800	20.420	18.890	23.500	29.620	42.920	46.620	18.250		16.950
Wheat	30.100	30.100	30.100	30.100	30.100	30.100	38.550	30.100	30.100	40.100	57.950	45.100
Fava bean					12.000	13.000				10.000	13.000	12.000
Soybean meal	32.860	28.520	25.150	24.220	11.610	7.130	28.080	23.160	19.840	18.540	6.730	5.200
Rapeseed meal				5.000	5.000	8.000				5.000	5.000	5.000
Wheat DDGS				3.000	5.000	5.000				3.000	5.000	
High fiber sunflower meal				8.120	7.730	5.190					5.020	8.000
Soybean oil	2.210	1.900	1.990	5.000	5.000	5.000		0.360	0.570	1.420	3.820	3.800
Corn gluten												1.100
Calcium carbonate	0.710	0.169	0.002	0.655	0.142		0.600	0.274	0.300	0.590	0.390	0.350
Bicalcic phosphate	2.160	1.850	1.540	2.050	1.730	1.400	1.970	1.870	1.560	1.880	1.540	1.350
Salt	0.236	0.207	0.211	0.192	0.150	0.158	0.270	0.246	0.280	0.254	0.180	0.230
Vitamins and minerals	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
Sodium carbonate	0.135	0.173	0.175	0.196	0.262	0.250	0.100	0.129	0.081	0.114	0.227	0.160
DL-Methionine	0.269	0.275	0.231	0.234	0.285	0.234	0.204	0.211	0.114	0.207	0.230	0.114
HCL Lysine	0.176	0.264	0.250	0.287	0.414	0.392	0.154	0.243	0.125	0.183	0.373	0.214
Threonine	0.076	0.111	0.094	0.088	0.157	0.135	0.052	0.087	0.010	0.062	0.140	0.032
Valine	0.021	0.061	0.041	0.038	0.130	0.106						
Tryptophan						0.005						
Calculated composition												
AMEn, kcal/kg	2850	2900	2950	2850	2900	2950	2750	2850	2900	2750	2850	2890
CP, g/kg	215.0	200.4	187.1	215.0	194.3	181.3	200.0	179.8	165.0	200.0	179.0	164.9
Lys, g/kg	11.200	10.900	10.000	11.200	10.900	10.000	10.000	9.500	7.800	10.000	9.500	7.810
Met + Cys, g/kg	8.400	8.170	7.500	8.400	8.170	7.500	7.500	7.200	6.000	7.500	7.200	6.000
Trp, g/kg	2.280	2.060	1.890	2.280	1.840	1.700	2.100	1.790	1.620	1.990	1.730	1.490

MATERIALS AND METHODS

The present study was performed in agreement with the French National Regulation for human care and use of animals for research purposes and received the authorization number 2018062715076382.V2-15695. Animals were reared at the PEAT INRAE poultry experimental facility (2018, <https://doi.org/10.15454/1.5572326250887292E12>) registered by the French Ministry of Agriculture under license number C-37-175-1 for animal experimentation (INRAE, Centre Val de Loire, and Nouzilly, France).

Birds and Housing

Two batches of animals were reared successively for this experiment. In the first batch, 80 male SASSO naked neck chickens, a slow-growing genotype dedicated to Label Rouge production (LR) were reared from 1 to 82 days, between September and December 2018. In the second batch, 80 Cobb 500 male chickens (STD) were reared from 1 to 35 days, between January and February 2019. Lighting and temperature schedules for both genotypes are provided in Supplementary table 4.1. At 1 day of age, the animals were identified with a wing band and an electronic Radio frequency identification device (RFID) chip, then weighed and placed in one pen on a floor covered with wooden chips. The RFID chip was placed at the base of the neck and secured with a plastic string passing under the skin. The pen was divided into two parts by a mesh bulkhead and the animals were dispatched into one of the two groups, with an equal starting weight for both groups. In the first part, the animals were fed with a classic corn-soybean diet (CD) as used in usual commercial conditions. In the second part, the animals were fed with an alternative diet (AD) including less soybean meal and a higher proportion of alternative feedstuffs such as sunflower, rapeseed, and fava bean. The composition of the diets is shown in Table 3.1. Within a genotype, the diets were isoproteic and isoenergetic. The diets differed between the two genotypes in order to fulfill the needs of slow- or fast-growing broilers. A starter diet was given from hatch to 7 d for STD birds (2850 kcal.kg⁻¹ DM; 21.5 % CP) and to 28 d for LR birds (2750 kcal.kg⁻¹ DM; 20.0 % CP). A grower diet was given from 8 to 22 d for STD chickens (2900 kcal.kg⁻¹ DM; 20.0 % CP) and from 29 to 63 d for LR chickens (2850 kcal.kg⁻¹ DM; 18.0 % CP). A finisher diet was given from 23 to 35 d for STD chickens (2950 kcal.kg⁻¹ DM; 18.5 % CP) and from 69 to 82 d for LR chickens (2900 kcal.kg⁻¹ DM; 16.5 % CP).

Feed Station

Body weight and feed intake were individually and continuously recorded throughout the experiment thanks to an electronic feed station (<https://www.feed-a-gene.eu/media/bird-e-automate-de-consommation-alimentaire-pour-volailles>). The feeder has a circular shape and consists of 8 independent accesses to feed, without corridors, so that the chickens can express their natural feeding behavior. Each access includes one feed tube, one feed trough, one antenna placed on the top of the feed trough to detect the animal's RFID chip, one scale for feed weight,

and one scale to record animal weight placed under the tray on which the animal climbs to eat. The feed troughs and the trays can be changed according to the size of the animals. Raw data obtained from the station are 1) feed weight by access every second, 2) identity of animal, time and access number every time an antenna detects a chip, and 3) mean animal weight during each visit. A visit is defined by consecutive readings of the same chip at the same access with less than 10 seconds between consecutive detections of the chip. All scales and antennas are connected to a central system of data acquisition. Because of electronic problems, data were acquired from 12 days on for the LR chickens. Reliable data could be obtained from day 3 onward for the STD chickens.

Meal Definition and Calculation of Feed Intake per Meal

Consecutive visits were grouped into meals as follows. A meal started each time a new chip is detected and ended when another one was read or when the chip was no longer detected during an interval of two minutes. This limit was defined using preliminary experiments during which we compared the behavior of animals obtained by video recording and data coming from the station (unpublished data). Occasionally, the chip is not detected by the antenna immediately after an animal's arrival or that the signal is lost before an animal's departure. In order to correct for this bias, we calculated the variance of feed weight data by intervals of 10 seconds before the start and after the end of the meal. Video analyses showed that a large variance of feed weight in the station (>0.1 g) is associated with pecking movement in the feed trough, and thus, that an animal is eating. Meal length was extended to include these periods of large variance.

For meal n starting at second S_n and ending at second E_n , feed intake (FI_n) is calculated as the difference of mean feed weight recorded every second between meals n-1 and n and between meals n and n+1. Outlier values of feed weights in these intervals were removed using the Cook's distance with a threshold of $1/k$, where k is the number of values in the interval. Feed intake of the meal was obtained as:

$$\begin{aligned}
 FI_n &= \frac{1}{1 + S_n - E_{n-1}} \sum_{i=1+E_{n-1}}^{S_n-1} FW_i - \frac{1}{1 + S_{n+1} - E_n} \sum_{i=1+E_n}^{S_{n+1}-1} FW_i \\
 &= \frac{1}{1 + S_n - E_{n-1} - NOV_1} \sum_{i=1+E_{n-1}}^{S_n-1} C_i \times FW_i \\
 &\quad - \frac{1}{1 + S_{n+1} - E_n - NOV_2} \sum_{i=1+E_n}^{S_{n+1}-1} C_i \times FW_i
 \end{aligned}$$

where FI_n is the feed intake for meal n, FW_i the feed weight at second i, S_n and S_{n+1} the times at which meals n and n+1 start, E_{n-1} and E_n the times at which meals n-1 and n end, C_i a

coefficient equal to 0 if the feed intake value at second i was an outlier and 1 if not, NOV_1 and NOV_2 the number of outlier values removed between meals $n-1$ and n and between means n and $n+1$, respectively.

When less than 10 seconds separated two successive meals $M1$ and $M2$ of respective durations $D1$ and $D2$, we did not obtain enough stable feed weight values to calculate a reliable mean feed weight between $M1$ and $M2$. A total feed intake (FI_{M1M2}) was calculated as the difference between mean feed weight before the start of $M1$ and after the end of $M2$. The feed intake of each meal (FI_{M1} , FI_{M2}) was then calculated according to the respective duration of each meal as:

$$FI_{M1} = \frac{D1}{D1 + D2} \times FI_{M1M2}$$

$$FI_{M2} = \frac{D2}{D1 + D2} \times FI_{M1M2}$$

In order to check the reliability of feed intake measured by the station, each time the feed tubes were refilled, the added quantity of feed was weighed and compared with the data obtained from the feed station after refilling.

The daily feed intake (DFI) was calculated as the sum of the feed intake of all meals eaten during a 24-hour period.

Body weight and daily gain calculation

Before calculating individual body weight (BW) on the different days, abnormal data were removed (weights below 25 g and above three times the mean BW of the previous day). Data outside the interval deviating from the mean by more than three standard deviations were then removed. Body weight (BW) was then calculated as the mean of all available weight data during a day for each animal.

In order to check the reliability of animal weight data from the station, animals were weighed manually, weekly for standard chickens and every two weeks for Label Rouge chickens.

Average Daily Gain and Feed Conversion Ratio Model

In order to smooth the daily variations of FCR, a moving average was used to calculate the daily feed conversion ratio, as already done in pigs (Huynh-Tran et al., 2017). Among the different possibilities tested, a moving average daily gain over 5 days (ADG) led to the lowest number of null or negative FCR values and the lowest daily coefficient of variation of FCR among individuals. Daily FCR was thus calculated as:

$$ADG_{ij} = \frac{BW_{i(j+2)} - BW_{i(j-2)}}{5}$$

$$DFCR_{ij} = \frac{DFI_{ij}}{ADG_{ij}}$$

with BW_{ij} being the mean weight of the animal i on day j and DFI_{ij} the daily feed intake of animal i for day j .

Cumulative feed conversion ratio

The daily cumulative feed conversion ratio for animal i on day j ($DCFCR_{ij}$) was calculated as the ratio of cumulated feed intake between the first day of data collection and day j to the weight gain over the same period:

$$DCFCR_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{k=j} DFI_{ik}}{BW_{ij} - BW_{i1}}$$

with DFI_{ik} being the daily feed intake of animal i for day k and BW_{ij} the body weight of animal i on day j .

Carcass Composition and Meat Quality

At 35 d for STD and 82 d for LR chickens, the animals were weighed after 8 hours of feed withdrawal and transferred to the slaughterhouse of the PEAT INRAE poultry experimental facility (2018, <https://doi.org/10.15454/1.5572326250887292E12>).

After 24 hours of chilling, body composition was characterized by measuring breast meat yield (BMY), *Pectoralis major* yield (PMY), *Pectoralis minor* yield (PmY), abdominal fat yield (AFY) and thigh yield (TY) in relation to body weight (BW). Except for the abdominal fat, which was taken entirely, only the right part of the animals was taken and the weight of the different parts was doubled to obtain those yields. Meat quality was evaluated on the *Pectoralis major* muscle by measuring lightness (L^*), yellowness (b^*) and redness (a^*) of the meat with a miniscan spectrophotometer (Hunterlab, Reston, VA, USA) and ultimate pH (pHu) with a portable pH meter (model 506, Crison Instruments SA, Alella, Barcelona, Spain).

Analysis of Variance

Analyses were done separately for each genotype, since the experiments had been conducted independently. The effect of the diet was first estimated separately for each day by applying the PROC ANOVA procedure of SAS 9.4 (2013) to data calculated for each day with diet as the single fixed effect: body weight (BW), average daily gain (ADG), feed intake (DFI), feed conversion ratio (DFCR), and cumulative feed conversion ratio (DCFCR). In a second step, three rearing phases were defined according to the feeding period: starter (S), grower (G), and finisher (F) phases when the animals were fed with the starter, grower, and finisher diets,

respectively. The birds' response to the diet depending on the feeding period was then analyzed with the following ANOVA model:

$$y_{ijk} = D_i + P_j + DP_{ij} + e_{ijk}$$

with y_{ijk} being the trait for animal k with diet i and period j , D_i the fixed effect of diet i , P_j the fixed effect of phase j (i.e. starter diet, grower diet, and finisher diet), DP_{ij} the interaction between diet i and phase j and e_{ijk} the residual for animal k . Both individual daily phenotypes and their coefficients of variation (calculated within-day) were analyzed, in order to consider the birds' response in term of mean and variability. Diet effect on slaughter traits was estimated by one-way ANOVA within each genotype, diet being the only fixed effect of the model.

Correlations with Daily Data

Correlations between the daily data (BW, ADG, DFI, DFCR) and the data measured at slaughter (final BW and final cumulative feed conversion ratio (CFCR_f), BMY, PMY, PmY, AFY, TY, L, a*, b* and pHu) were calculated by using the Rcorr function of the package Hmisc of the R software (R Core team, 2017).

Table 3.2. Diet and period effects on body weight (BW), average daily gain (ADG), feed intake (DFI), feed efficiency (DFCR) and cumulated feed efficiency (DCFCR).

		Label Rouge chickens					Standard chickens					
		BW (g)	ADG (g.d ⁻¹)	DFI (g.d ⁻¹)	DFCR	DCFCR	BW (g)	ADG (g.d ⁻¹)	DFI (g.d ⁻¹)	DFCR	DCFCR	
LS Means ³	Diet ¹	AD	1472 ^a	31.7 ^a	98.3	3.09 ^b	1.95 ^b	724	47.8	93.6 ^b	1.79 ^b	1.44
		CD	1431 ^b	31 ^b	98.1	3.20 ^a	2.05 ^a	727	46.8	90.2 ^a	1.86 ^a	1.46
	Period ²	S	370 ^c	21.3 ^c	46.5 ^c	2.32 ^c	1.70 ^c	121 ^c	17.3 ^c	27.9 ^c	1.67 ^c	1.25 ^b
		G	1366 ^b	37.9 ^b	104.2 ^b	2.82 ^b	1.94 ^b	498 ^b	42.8 ^b	77.7 ^b	1.85 ^b	1.53 ^a
		F	2620 ^a	35.0 ^a	143.8 ^a	4.28 ^a	2.36 ^a	1558 ^a	81.9 ^a	170.1 ^a	1.96 ^a	1.57 ^a
	Diet×Period	AD×S	381	22.1 ^d	45.9	2.20	1.64 ^e	117	17.5	28.1	1.54 ^d	1.26
		AD×G	1398	38.6 ^a	105.8	2.80	1.86 ^c	493	43.1	76.6	1.86 ^{bc}	1.51
		AD×F	2639	34.5 ^c	143.1	4.26	2.35 ^a	1562	82.9	174.2	1.97 ^a	1.55
		CD×S	359	20.5 ^d	47.1	2.44	1.77 ^d	125	17.1	27.7	1.79 ^c	1.24
		CD×G	1334	37.1 ^b	102.6	2.84	2.02 ^b	503	42.4	76.8	1.85 ^c	1.56
CD×F		2601	35.5 ^c	144.5	4.30	2.38 ^a	1554	80.9	166.0	1.95 ^{ab}	1.57	
P-value	Diet	0.003	0.020	0.870	0.010	0.001	0.811	0.090	0.050	0.030	0.506	
	Period	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
	Diet×Period	0.277	0.001	0.107	0.100	0.001	0.842	0.432	0.070	0.001	0.523	

¹ AD: alternative diet; CD: control diet

² S: starter diet (d1 to d7 for STD, d1 to d28 for LR); G: grower diet (d8 to d22 for STD, d29 to d63 for LR); F: finisher diet (d23 to d35 for STD, d69 to d82 for LR)

³ within effect, trait and genotype, LS means values with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$)

RESULTS

Validation of Growth and Feed Intake Data

On average, the absolute value of the difference between manual and automatically recorded data of body weight was low (2.2%). Similarly, the difference between feed weight displayed by the feed station and the real feed weight at each refilling was low (0.3 %).

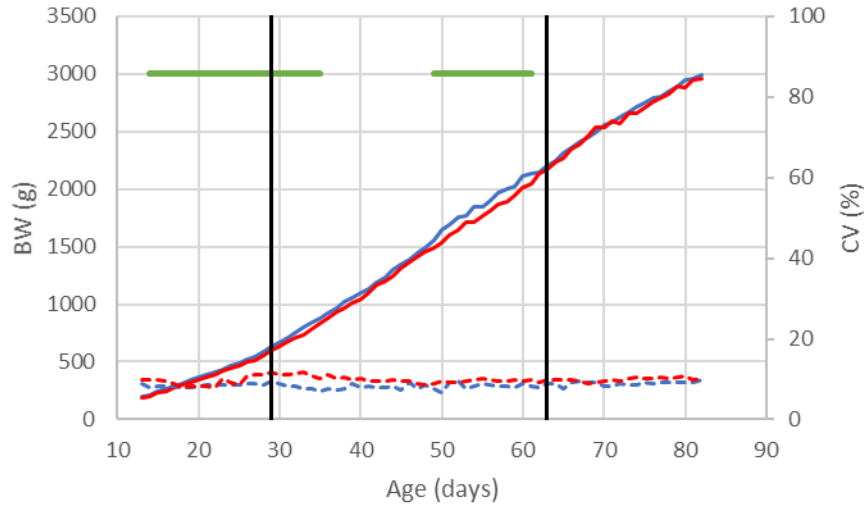
Diet effect on growth parameters

Effect on the mean The ADG of LR chicken showed the same trends of kinetics in both diets, with a first phase of increasing, followed by a plateau and a last phase of decreasing (Figure 3.4.c). As the length of the plateau lasted 10 days with the AD diet and 20 days with the CD diet, ADG decreased earlier with AD (after 55 d) than with CD (after 70 d). The ADG of animals fed with the AD diet was 8 to 28% higher between 15 and 33 d (starter phase and start of grower phase), and 8 to 45% higher between 48 and 57 d (grower phase). In contrast, from 60 to 68d (finisher phase), animals fed with AD showed a 10 to 40% lower ADG than with the CD diet (Supplementary table 4.2). This kinetics was consistent with a slight advantage of BW for birds fed AD from 14 to 40 days and from 49 to 61 days (4.3 to 8.5%) and the absence of difference after this age (Figure 3.4.a, Supplementary table 4.2). Unlike the LR chickens, ADG increased until the end of the experiment for both diets in STD chickens (Figure 1d), which are slaughtered at a much younger age than LR chickens. Diet had a much smaller impact in STD than in LR chickens, as shown by the global analysis by feeding period in which diet effect on ADG and BW was significant in STD chickens, but not in LR chickens (Table 3.2). Only during a 5-days period between 27 and 31 d was ADG 5 to 15% higher with AD than with CD (Supplementary table 4.3). Consistent with the absence of difference in ADG between diets, the growth curves of STD birds were similar between the two diets (Figure 3.4.b).

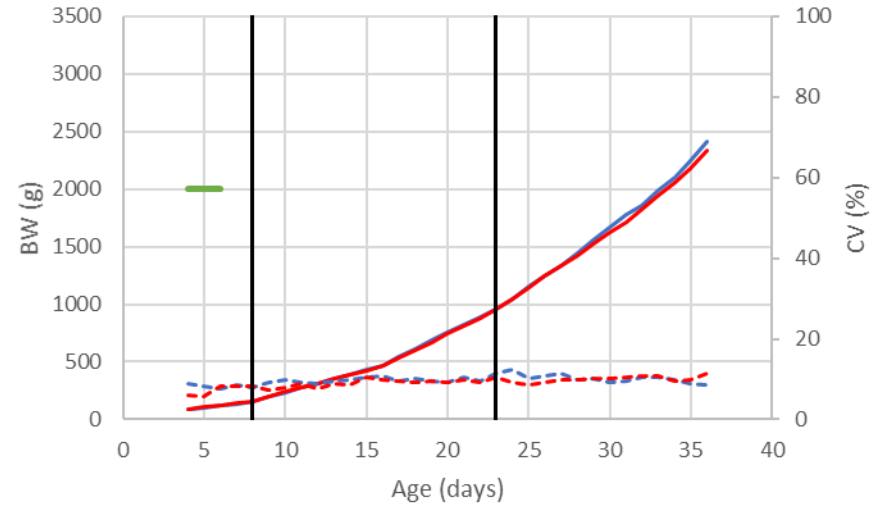
Effect on the variability. The CV for ADG in STD chickens and for BW in both genotypes was stable and low at all ages, usually lower than 20% (Figure 3.4.a, b, d). In contrast, CV for ADG in LR chickens varied with age for both diets, being stable until 35 days and increasing from 35 to 82 d up to values as high as 50% (Figure 3.4). Despite similar trends, the kinetics of the CV of ADG during the three periods differs between the two diets. For the AD diet, CV increased from the starter to the grower diets while the increase occurred between the grower and finisher phases for the CD diet (Table 3.2). A significant interaction between diet and phase was also observed on BW variability in LR chickens. Indeed, LR animals fed with AD were 14.3% less variable than those fed with CD, only during the grower phase, whereas STD chickens fed with AD showed a 27.1% higher variability than those fed with CD over the whole period (Table 3.2).

Figure 3.4. Kinetics of the mean and of the coefficient of variation for BW (4a for LR; 4b for STD) and ADG (4c for LR; 4d for STD) for chickens fed with classical diet or alternative diet.

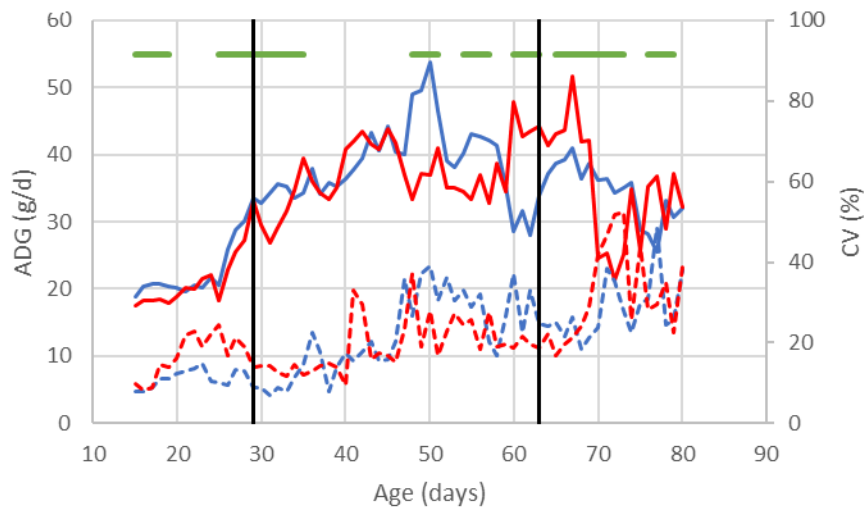
3.4.a



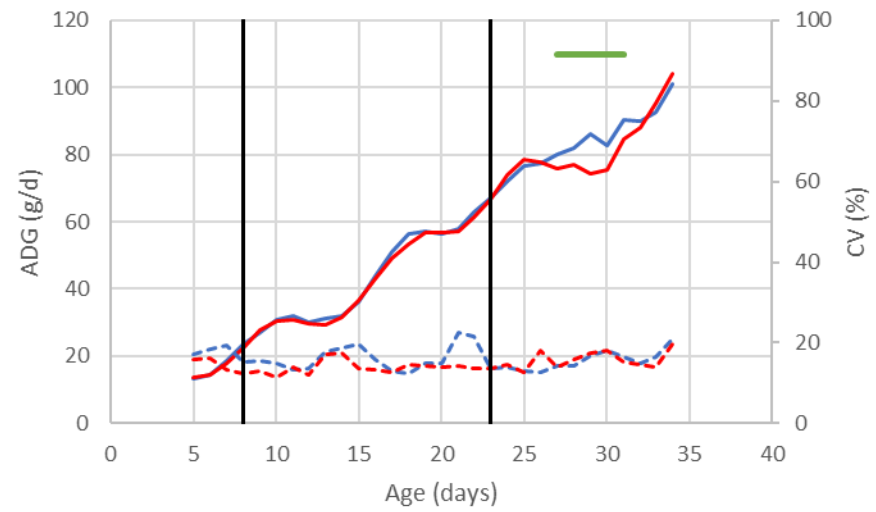
3.4.b



3.4.c



3.4.d



- Mean : alternative diet
- Mean : classical diet
- - Coefficient of variation : alternative diet
- - Coefficient of variation : classical diet
- Significant diet effect
- | Diet changes

Diet effect on feed intake and efficiency traits.

Effect on the mean. For both diets and genotypes, as expected, DFI increased with age (Figure 3.5). No difference was observed between diets in LR chickens, except at 20, 26, 28 and 42 days, with no clear advantage for CD or AD (Figure 3.5.a, Supplementary table 4.4). In contrast, in STD chickens, DFI was continuously higher with AD than with CD, but the difference was significant only during the 4th week, before the last diet change (Figure 3.5.b, Supplementary table 4.4). During this period, DFI was 7.4 to 12.4% higher with AD than with CD. Summarizing information by feeding period, we observed a diet effect in STD chickens, DFI being 3.8% higher for chickens fed with AD than with CD (Table 3.2).

DFCR was highly variable between consecutive days, especially in LR chickens (Figure 3.5.c, d, Supplementary table 4.5), while curves for DCFRCR were smoothed (Figure 3.6.a, b). Thus, in LR chickens DFCR was significantly better with AD for several days around the first diet change (17-32 d), but better for CD for several days around the second diet change (60-68 d), whereas a continuous difference was observed for DCFRCR between 17 to 40 days, AD birds being 6.8 to 13% more efficient than CD birds during this period (Supplementary table 4.6-4.10). Consistent with the other findings, when summarized by nutrition periods, diet effect was seen only during the starter phase for DFCR, while it was seen for both the starter and grower phases for DCFRCR.

Like the LR chickens, differences of DFCR between diets in STD chickens were sporadic and limited to 5 days between 9 and 25 d (Figure 3.5.d, Supplementary table 4.5). During these 5 days, DFCR was 10.7 to 14.7 % lower for CD birds. This was confirmed by the analysis of DFCR by period (Table 3.2), for which a diet by period interaction was significant, due to a positive effect of the AD diet, but only during the starter phase. When considering DCFRCR, diet effect was no longer significant (Figure 3.6.b, Table 3.2).

Effect on the variability. Change with age of DFI, DFCR, and DCFRCR coefficients of variation differed between traits and genotypes, although similar trends were found between diets. The general trend was an increase in the CV of the 3 traits with age in LR chickens (Figure 3.4.a, c, Figure 3.5.a) and a decrease in STD chickens (Figure 3.4b, d, Figure 3.5.b).

Figure 3.5. Kinetics of the mean and of the coefficient of variation for DFI (2a for LR; 2b for STD) and DFCR (2c for LR; 2d for STD) for chickens fed with classical diet or alternative diet.

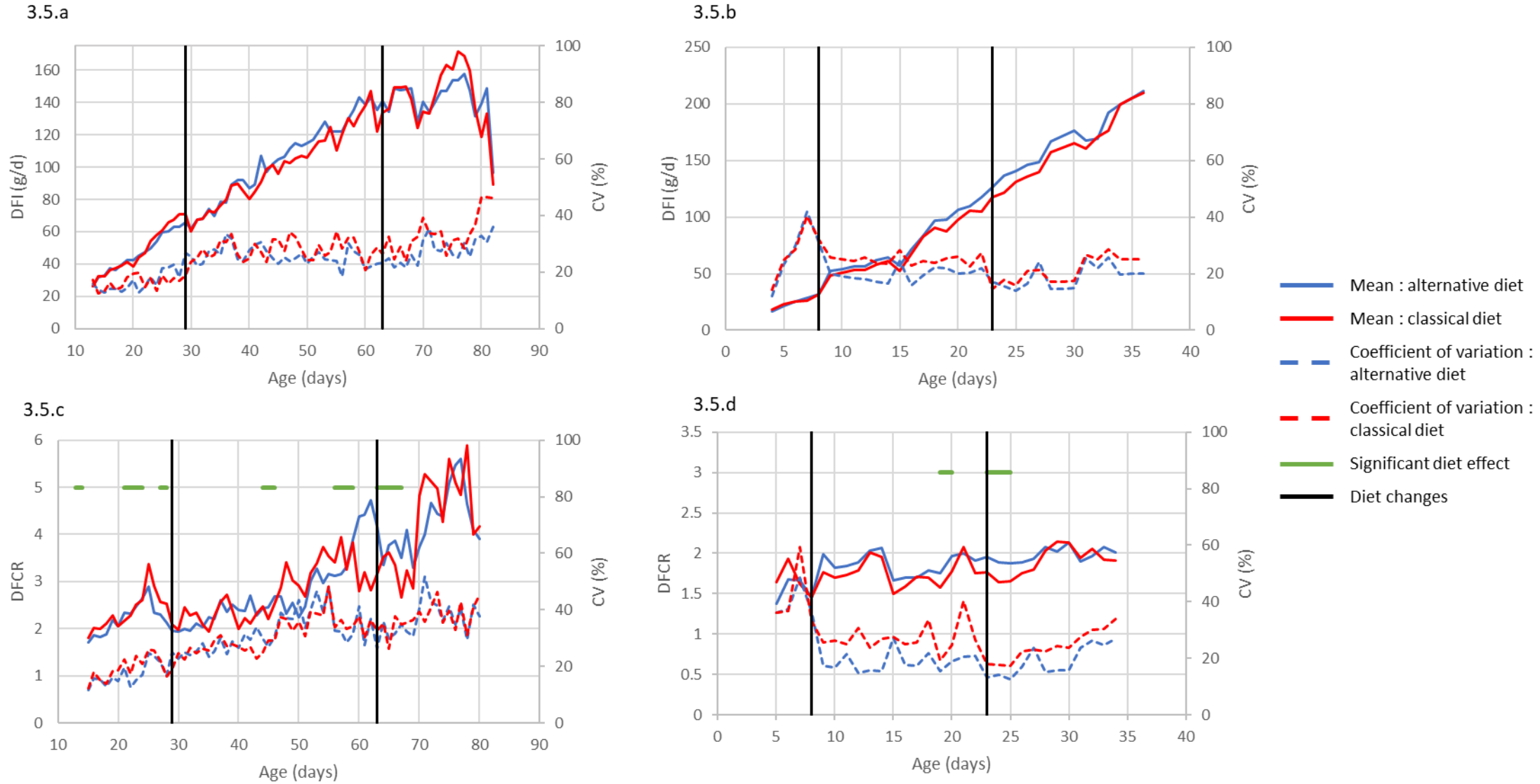


Table 3.3. Diet and period effects on the coefficient of variation of body weight (BW), average daily gain (ADG), feed intake (DFI), feed efficiency (DFCR) and cumulated feed efficiency (DCFRCR) for each chicken genotype.

		Label Rouge chickens					Standard chickens				
		BW (%)	ADG (%)	DFI (%)	DFCR (%)	DCFRCR (%)	BW (%)	ADG (%)	DFI (%)	DFCR (%)	DCFRCR (%)
Diet ¹	AD	8.7 ^b	20.3	21.6 ^a	28.0 ^a	18.0 ^b	10.8 ^a	13.0	20.5 ^b	23.9 ^b	33.1 ^b
	CD	9.5 ^a	22.6	27.4 ^b	31.0 ^b	24.0 ^a	8.5 ^b	12.9	25.0 ^a	34.3 ^a	43.0 ^a
Period ²	S	8.8 ^b	14.1 ^c	15.9 ^a	19.3 ^a	16.1 ^c	8.5 ^b	13.4	26.9 ^a	42.3 ^a	52.4 ^a
	G	9.1 ^{ab}	20.5 ^b	25.8 ^b	32.0 ^b	22.4 ^b	10.0 ^a	13.0	22.0 ^b	23.4 ^b	36.1 ^b
	F	9.3 ^a	29.8 ^a	31.8 ^c	37.0 ^c	34.5 ^a	10.4 ^a	12.5	19.4 ^c	21.5 ^c	25.6 ^c
LS Means ³											
Diet×Period	AD×S	8.7 ^c	11.1 ^d	16.1 ^d	16.2 ^c	15.2 ^e	9.8	13.6	26.6 ^a	37.6	58.4 ^a
	AD×G	8.4 ^c	21.7 ^{bc}	23.9 ^c	32.4 ^b	19.9 ^c	11.5	13.5	17.7 ^c	16.7	26.1 ^c
	AD×F	9.0 ^{bc}	28.1 ^{ab}	24.9 ^{bc}	35.2 ^{ab}	18.8 ^{cd}	11.2	11.9	17.2 ^{bc}	17.2	14.7 ^d
	CD×S	8.9 ^c	17.1 ^{cd}	15.7 ^d	22.5 ^c	17.0 ^{de}	7.3	13.2	27.2 ^a	47.0	46.3 ^{ab}
	CD×G	9.8 ^a	19.3 ^c	27.7 ^b	31.4 ^b	24.8 ^b	8.6	12.3	26.4 ^a	30.0	46.1 ^a
	CD×F	9.7 ^{ab}	31.6 ^a	38.7 ^a	38.8 ^a	30.1 ^a	9.6	13.3	21.5 ^{ab}	25.8	36.4 ^b
P-value	Diet	0.001	0.130	0.001	0.020	0.001	0.001	0.940	0.001	0.001	0.001
	Period	0.010	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.615	0.001	0.001	0.001
	Diet×Period	0.002	0.046	0.001	0.036	0.001	0.192	0.105	0.020	0.276	0.001

¹ AD: alternative diet; CD: control diet

² S: starter diet (d1 to d7 for STD, d1 to d28 for LR); G: grower diet (d8 to d22 for STD, d29 to d63 for LR); F: finisher diet (d23 to d35 for STD, d69 to d82 for LR)

³ within effect, trait and genotype, LS means values with different superscripts are significantly different ($P<0.05$)

Within each genotype, the CV of DFI and DFCR of LR increased with time, with a steeper slope in the starter phase than in the grower and finisher phases. The CV of DCFCR of LR-CD animals increased continuously whereas it remained stable after the first change of diet for LR-AD. In STD chickens, after a peak with high CV values during the starter phase, the CV decreased and stabilized during the grower and finisher phases for DFI and DFCR. A similar profile was observed for DCFCR, although the decrease in CV was more pronounced with AD than with CD.

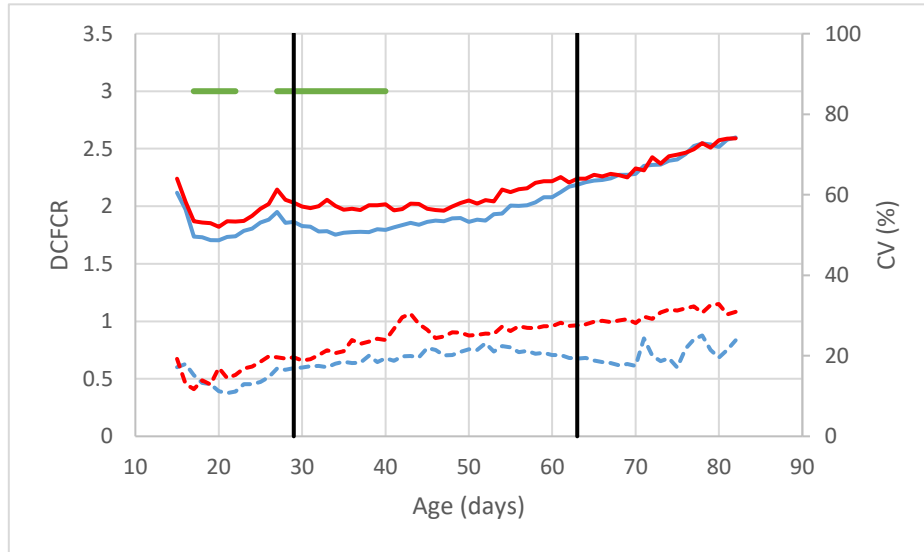
Differences of variability between diets for DFI, DFCR, and DCFCR were strong in STD (Figure 3.4, Figure 3.5, Table 3.3). Alternative diet led to a decrease in the variability of those performances during the grower (DFI: -49%, DFCR: -30.4%, DCFCR: -44%) and finisher phases (DFI: -20%, DFCR: -30.4%, DCFCR: -58.4%) in STD chickens. In the case of LR chickens, the CV differed between diets during these phases for DFI and DCFCR traits. When significant, performances were less variable with the AD than with the CD diet.

Diet effect on carcass composition and meat quality

Body composition and meat quality traits were not affected by diet in LR chickens, except for thigh yield, which was slightly higher with the AD than with the CD diet (Table 3.4). In STD chickens, the abdominal fat percentage was significantly lower with AD compared to CD (-14%, $P < 0.001$). When fed with the CD diet, STD chickens had a more acidic (lower pHu) and yellower (higher b^* value) meat than those fed with AD. No diet effect was observed on the variability of the studied traits regardless of the genotype (data not shown).

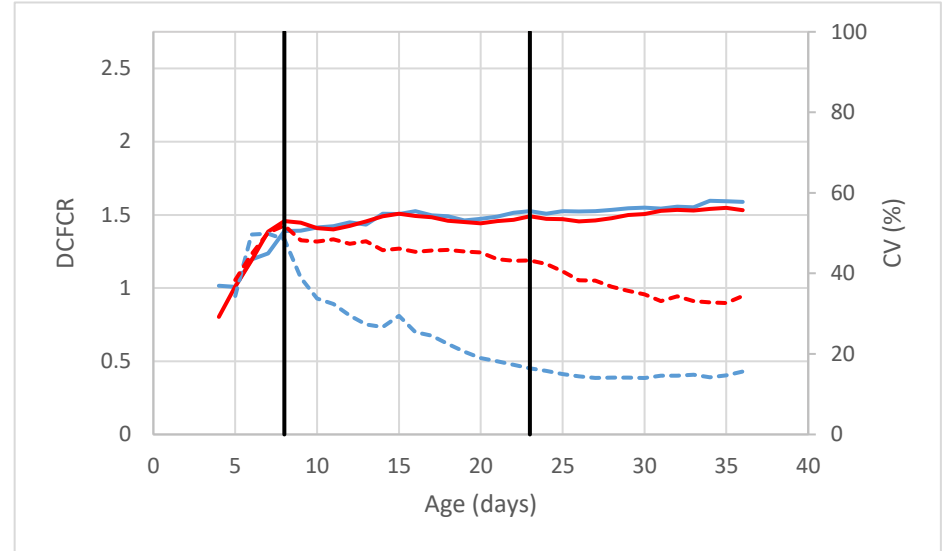
Figure 3.6. Kinetics of the mean and of the coefficient of variation for DCFCR (3.4.a for LR; 3.4.b for STD) for chickens fed with classical diet or alternative diet.

3.6.a.



— Mean : alternative diet — Mean : classical diet
 — Coefficient of variation : alternative diet — Coefficient of variation : classical diet
 — Significant diet effect — Diet changes

3.6.b.



— Coefficient of variation : alternative diet — Coefficient of variation : classical diet
 — Diet changes

Table 3.4. Body composition and meat characteristics of label rouge (LR) and Cobb500 (STD) genotypes fed with either the alternative diet or the classical diet

Trait ¹	Genotype	LS Means		P-value of diet effect
		Diet ²		
		AD	CD	
Slaughter weight (g)	LR	3010	2951	0.371
	STD	2334	2355	0.720
AFY (%)	LR	3.53	3.95	0.080
	STD	1.57	1.83	0.001
BMY (%)	LR	14.56	14.40	0.550
	STD	20.44	20.40	0.970
TY (%)	LR	25.64	25.16	0.030
	STD	22.58	22.94	0.100
L*	LR	48.76	49.14	0.520
	STD	47.99	47.38	0.250
a*	LR	-1.06	-1.09	0.860
	STD	-0.51	-0.72	0.100
b*	LR	9.82	9.48	0.230
	STD	8.02	8.89	0.001
pHu	LR	5.74	5.72	0.350
	STD	5.89	5.79	0.001

¹ AFY: abdominal fat yield, BMY: breast muscle yield, TY: thigh yield, L*: breast meat luminance, a*: breast meat redness, b*: breast meat yellowness, pHu: breast meat pH 24 h after slaughter

² AD: alternative diet; CD: control diet

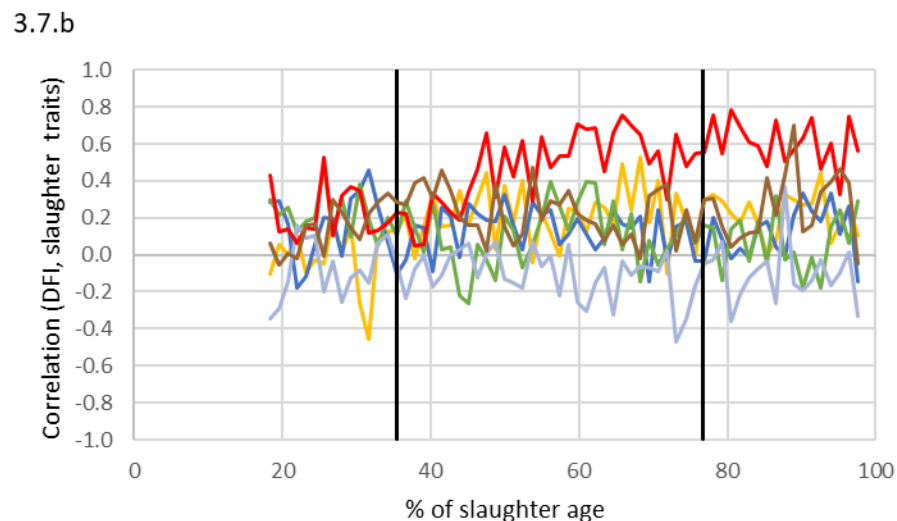
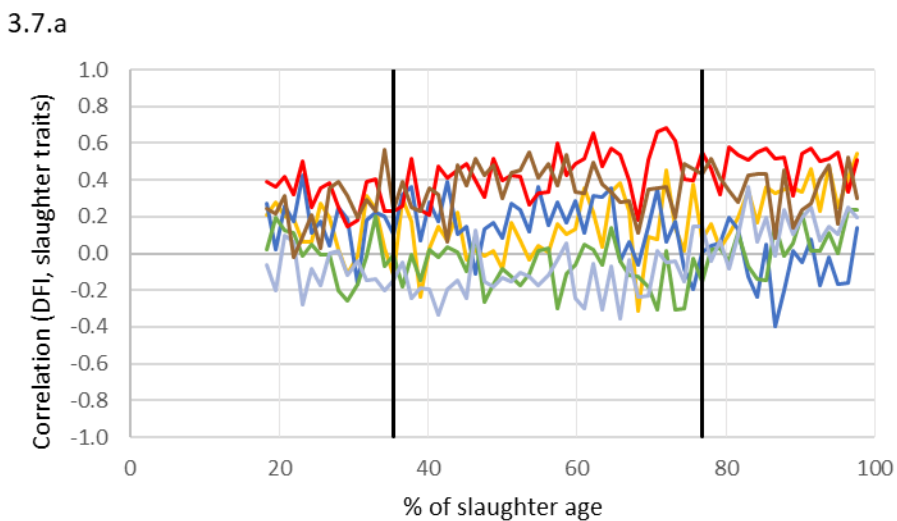
Correlations between Daily Traits and Cumulative Feed Conversion Ratio or Slaughter Traits.

Feed Intake. On the whole, DFI was positively correlated with the CFCR_f (Figure 3.7). In LR chickens, the correlation was lower during the starter phase (0.32 with AD, 0.22 with CD), increased during the grower phase (0.44 with AD, 0.47 with CD), and remained stable during the finisher phase (0.50 with AD, 0.61 with CD). In STD chickens, DFI and CFCR_f were poorly correlated during the starter phase (on average 0.23 with AD and 0.40 with CD). During the grower phase, the correlation became stable and reached a higher level with CD (0.62 on average) than with AD (0.21 on average). During the finisher phase, a high correlation between DFI and CFCR_f was maintained for STD chickens fed with CD diet (0.61), whereas it increased for those fed with the AD diet (0.53).

On the other hand, a moderate correlation with slaughter weight was observed for LR chickens starting at the first change of diet, stronger for those fed with AD (0.36) than with CD (0.24). We also observed a moderate positive correlation between DFI and breast final pH for these animals, particularly during the finisher phase (0.23 with CD, 0.32 with AD), whereas this correlation was low and negative in STD chickens (-0.04 with CD, -0.13 with AD). In STD chickens fed AD, the correlation between DFI and pH_u was strongest at the beginning of the grower phase (-0.30 between 25.7 and 40 % of the age at slaughter). During the same period, DFI was positively correlated with slaughter weight, as well as breast and abdominal fat yields (0.50, 0.40, and 0.30, respectively), whereas these correlations became weak during the finisher phase.

Body Weight. As expected, the correlation between daily BW and slaughter weight increased with time to reach 1 on the last day (Figure 3.8). Even at the youngest ages, this correlation was found to be higher than 0.50, independently of the treatment. Correlations between body weight and other slaughter traits were weak and rather stable with age in LR chickens. We only observed moderate positive correlations in LR-AD birds with fatness during the starter phase (0.32) and breast yield during the finisher phase (0.31). During this period, a moderate, positive correlation was also found with thigh yield in LR-CD chickens (0.23). In contrast, corresponding correlations varied with age or diet in STD chickens. Thus, correlations with meat ultimate pH or CFCR_f were stable across ages, but more pronounced with the AD than with the CD diet (-0.39 and 0.01 for pH_u and -0.43 and -0.27 for CFCR_f, respectively). While weak correlations were found between daily BW and thigh yield for both diets, different profiles were found for fat yield, the correlation being stable and moderate (0.32) for STD-CD chickens, but low for STD-AD chickens. Finally, correlations between daily BW and breast yield increased with age and reached quite significant values during the finisher phase in STD chickens (0.58 with AD, 0.56 with CD).

Figure 3.7. Profiles of correlations for LR (a: AD, b: CD) and STD (c: AD, d: CD) chickens between DFI and traits measured at slaughter.



- pHu
- Thigh yield
- Abdominal fat percentage
- Breast meat yield
- Final DCFCR
- Body weight
- Diet changes

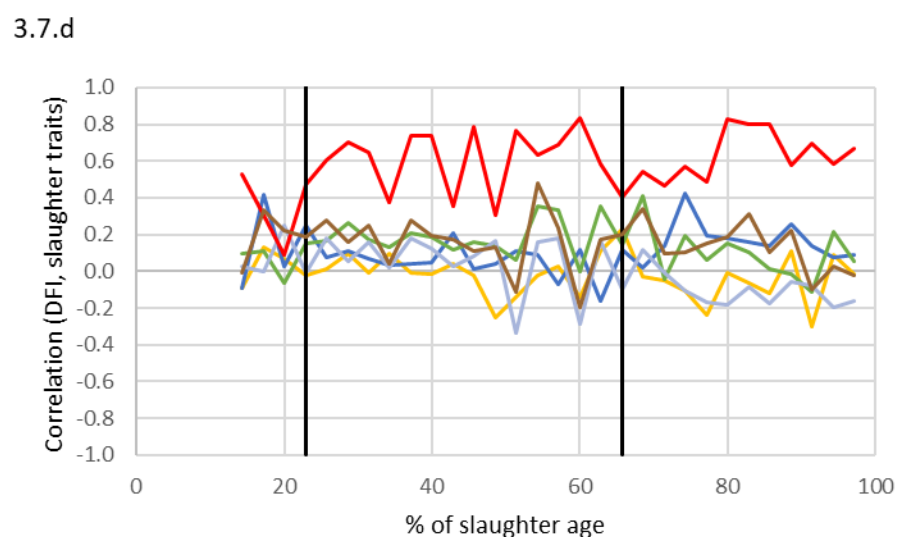
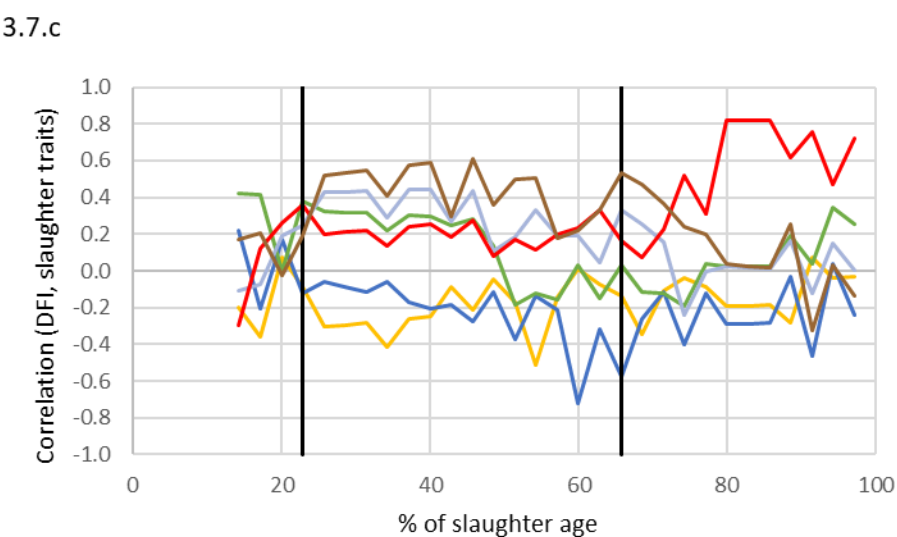
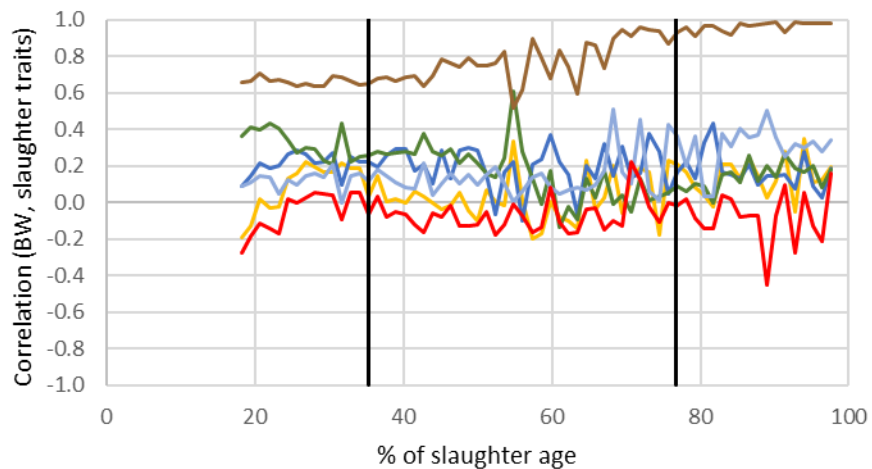
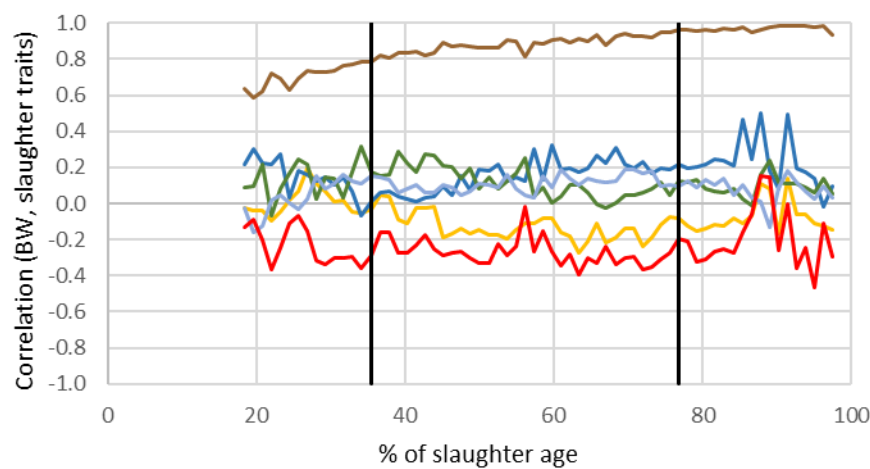


Figure 3.8. Profiles of correlations for LR (a: AD, b: CD) and STD (c: AD, d: CD) chickens between BW and traits measured at slaughter.

3.8.a

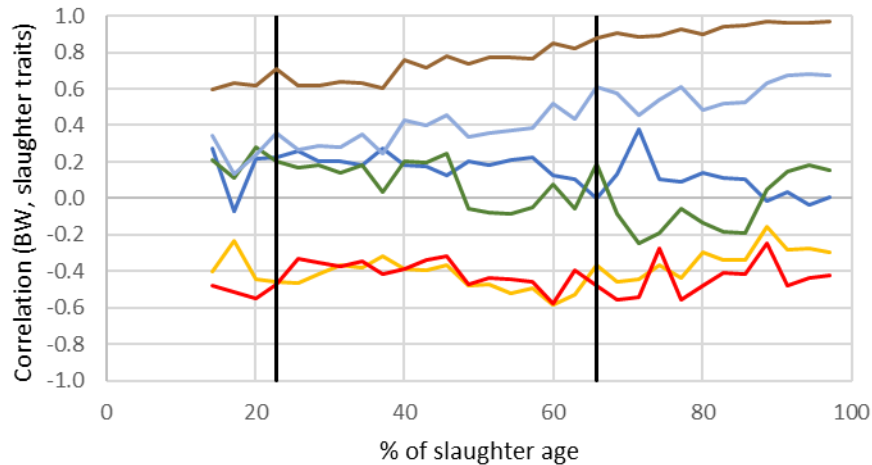


3.8.b



- pHu
- Thigh yield
- Abdominal fat percentage
- Breast meat yield
- Final DCFCR
- Body weight
- Diet changes

3.8.c



3.8.d

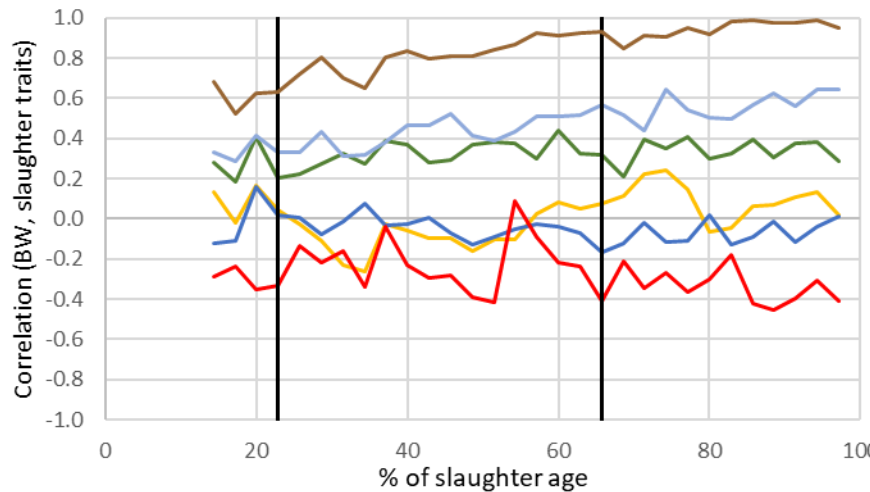
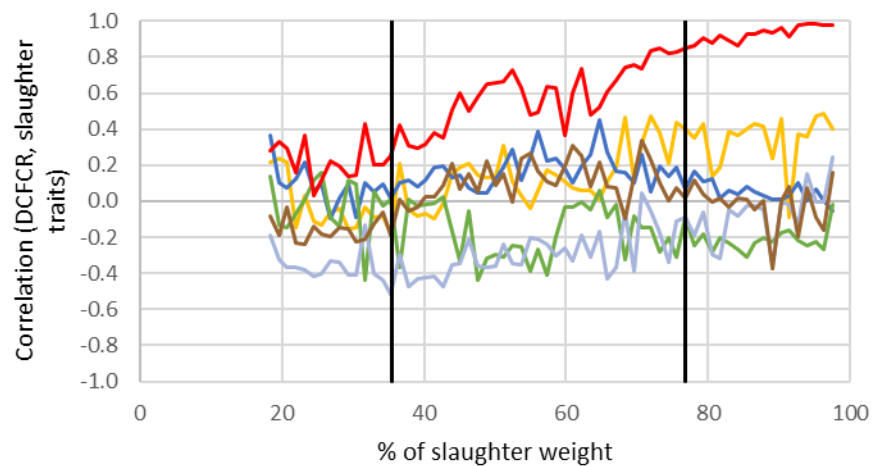
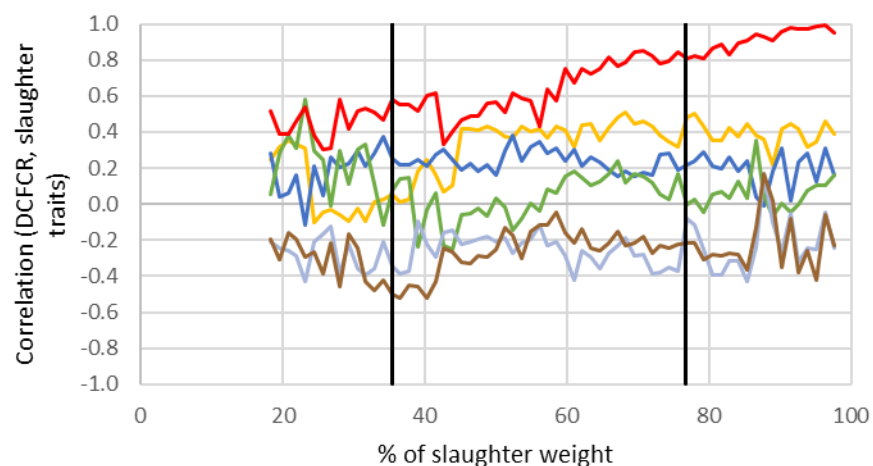


Figure 3.9. Profiles of correlations for LR (a: AD, b: CD) and STD (c: AD, d: CD) chickens between DCFCR and traits measured at slaughter.

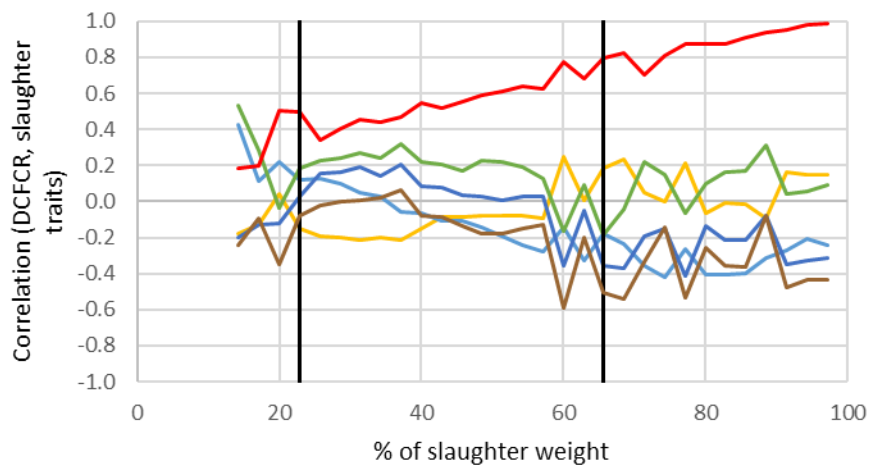
3.9.a



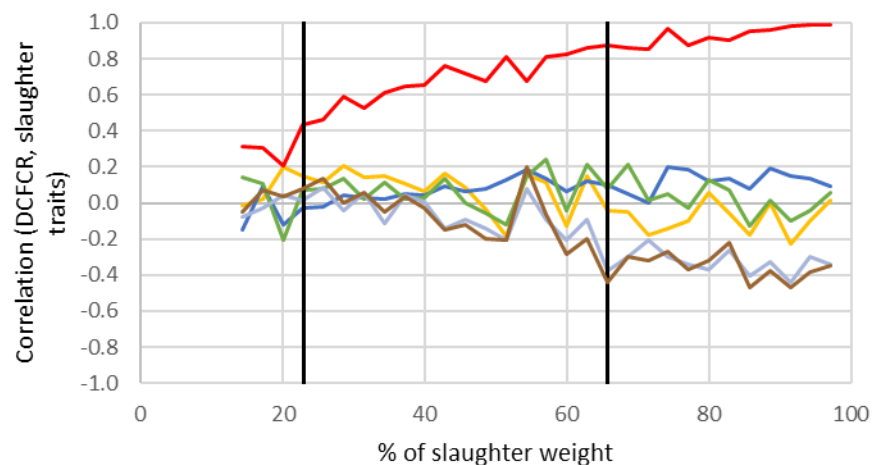
3.9.b



3.9.c



3.9.d



- pHu
- Thigh yield
- Abdominal fat percentage
- Breast meat yield
- Final DCFCR
- Body weight
- Diet changes

Cumulative Feed Efficiency. As expected, the correlation between DCF_{CR} and CFCR_f increased with age to reach 1 at slaughter (Figure 3.9). For LR chickens, better efficiency was associated with a higher breast yield and weight at slaughter, especially with CD (-0.29 and -0.47, respectively). Similar trends were observed for STD chickens during the finisher phase (-0.27 and -0.36 with AD, -0.33 and -0.34 with CD). Abdominal fat percentage and thigh yield were poorly correlated with DCF_{CR}. Finally, a lower breast meat pH and thus more acidic meat was associated with a lower DCF_{CR}, at least for LR-CD chickens during the grower and finisher phases (0.40). This trend was not found in STD chickens.

DISCUSSION

The aim of our study was to determine the capacity of adaptation of slow and fast-growing chickens to a diet containing a mixture of alternative feedstuffs, in real conditions of production, i.e. on floor and in group. Previous studies showed that FI recorded in cages differed from FI recorded on the floor. However, since many factors such as sex, diet composition, and cage or litter material influenced FI, BW, and FCR, the results of these studies were inconsistent (Akpobome and Fanguy, 1992; Plavnik et al., 2002; Santos et al., 2008; Simsek et al., 2014; Zhao et al., 2015). Automaton have already been developed to record FI on the floor. However, none are capable of simultaneously measuring FI and body weight throughout the whole life of animals and without limiting the expression of natural behaviours due to the presence of systems of isolation of animals (Bley and Bessei, 2008; Howie et al., 2009; Tu et al., 2011; Basso et al., 2014; Yan et al., 2019). Thus, only synthetic FCR could be obtained with those automaton while ours is able to measure the kinetics of these types of traits.

The current study showed that differences between the two diets are moderate in terms of final performances in both genotypes, indicating that chickens are able to adapt to a diet composed of a mixture of alternative feedstuffs, with a higher proportion of wheat than corn and a partial replacement of soybean by DDGS, rapeseed, fava bean, and sunflower meals. The literature on the adaptation of chickens to a partial substitution of soybean by these feedstuffs showed contrasted results both in slow- and fast-growing chickens. Depending on the study, alternative diets led to better, similar, or worse FCR (Diaz et al., 2006; Bosco et al., 2013; Foltyn et al., 2013; Lessire et al., 2015; Méda et al., 2015; Koivunen et al., 2016; Alagawany et al., 2017; Toghyani et al., 2017). An absence of effect on FCR does not necessarily mean that there is no effect on performances that contribute to FCR.

For example, for the LR chickens in this study as well as for the STD chickens in Diaz et al. (2006), the absence of effect of the alternative diet on FCR was due to a joint increase in FI and BW rate with AD. This discrepancy between studies could be due to many factors such as the animals (genotype, age, sex) and the feedstuffs (quality, fiber percentage, and

transformation process). The most striking difference in the adaptability of chickens to the alternative diet was found in the variability of performances. Animals fed with the alternative diet had more homogeneous performances for FI and daily and cumulative FCR, especially in STD chickens.

Another interest of the daily data is that it highlighted the importance of transition periods around diet changes. Modifications of performances around the time of the diet change could indicate a difficulty in adapting to the new diet if it appears after the transition or a necessity to change the diet earlier if it appears before the transition. These modifications are genotype and diet dependent and could be linked to several factors. For example, some diets has been shown to modify the development of digestive tract and thus its capacity of absorption (Nassiri Moghaddam et al., 2012). A difference of palatability between successive diets can be a cause of variations occurring after transitions. The drop we observed in weight gain despite the continuous increase in FI before the second diet change for the LR-AD chickens can suggest that the animals' needs are not fulfilled anymore and that the diet change should have been done 3 to 4 days earlier, whereas this is not the case with the classic diet or with the STD chickens. Similarly, the strong increase in the coefficient of variation of FI in STD chickens before the first diet change may indicate that this diet change occurs too late for some of the birds. This daily information could also help us to identify animals that are resilient to disturbances in their environment, especially around times of dietary transitions.

Finally, the correlation profiles between daily measurements and phenotypes measured at slaughter are useful to understand early indicators of final phenotypes. These indicators differ between genotypes and diets, which also highlights the fact that final phenotype construction differs between genotypes and diets. For example, DFI is a good indicator of final FCR in STD chickens fed with CD, as the correlation between both traits is high as early as the first diet change. In contrast, when fed with AD, the correlation between both traits increased later, after the second diet change. The correlations between BW, AFY, BMY, and breast meat pH_u in STD chickens also show that animals do not respond to CD and AD in the same way. For instance, although increased BW at early ages appears to be an indicator of increased breast meat yield at slaughter for both diets, it also seems to be associated with higher muscle glycogen reserves which are the cause of lower ultimate pH (Le Bihan-Duval et al., 2008) for birds fed the AD, and of higher abdominal fatness for birds fed the CD. This is maybe why the correlation between BW at an early age and CFCR_f seems a little bit lower with CD than with AD, the energy cost of glycogen deposition in breast muscle being lower than the energy cost of abdominal fat deposition. In the current study, we also found indications showing that better FCR at early ages could be a predictor of higher breast development at slaughter in LR chickens, and could be of interest to limit the production costs of this alternative production and to satisfy the needs of the growing market of cuts and further processed products.

To conclude, both genotypes showed a good ability to adapt to alternative diets. Taking into account the costs of feedstuffs and mean feed intake, using these alternative diets would increase feed cost by 1.5% for LR chicken and 3.4% for the STD chicken, close to the 0.5-4% of increasing already found in literature (Nguyen et al., 2012). This represents an increase of respectively 0.9% and 2% of the total production costs (ITAVI, 2016). However, it has been shown that replacing soybean by local feedstuffs can decrease greenhouse gas emission up to 41% depending of the percentage of replacement and the genotype (Lessire et al., 2015; Méda et al., 2015). This element is important to evaluate the environmental impact of both diets which has to be taken into account in the perspective of making poultry meat production more sustainable.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by Feed-a-Gene, a project that has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No. 633531.

REFERENCES

- Akpobome, G. O., and R. C. Fanguy. 1992. Evaluation of cage floor systems for production of commercial broilers. *Poult. Sci.* 71:274–280.
- Alagawany, M., A. I. Attia, Z. A. Ibrahim, R. A. Mahmoud, and S. A. El-Sayed. 2017. The effectiveness of dietary sunflower meal and exogenous enzyme on growth, digestive enzymes, carcass traits, and blood chemistry of broilers. *Environ Sci Pollut Res Int* 24:12319–12327.
- Basso, B., M. Lagüe, G. Guy, E. Ricard, and C. Marie-Etancelin. 2014. Detailed analysis of the individual feeding behavior of male and female mule ducks. *J Anim Sci* 92:1639–1646.
- Bley, T. A. G., and W. Bessei. 2008. Recording of Individual Feed Intake and Feeding Behavior of Pekin Ducks Kept in Groups. *Poult. Sci.* 87:215–221.
- Bosco, A. D., S. Ruggeri, S. Mattioli, C. Mugnai, F. Sirri, and C. Castellini. 2013. Effect of Faba Bean (*Vicia Faba* Var. Minor) Inclusion in Starter and Growing Diet on Performance, Carcass and Meat Characteristics of Organic Slow-Growing Chickens. *Ital. J. Anim. Sci.* 12:e76.
- Diaz, D., M. Morlacchini, F. Masoero, M. Moschini, G. Fusconi, and G. Piva. 2006. Pea seeds (*Pisum sativum*), faba beans (*Vicia faba* var. minor) and lupin seeds (*Lupinus albus* var. multitalia) as protein sources in broiler diets: effect of extrusion on growth performance. *Ital. J. Anim. Sci.* 5:43–53.

- European Commission. 2019. United States is Europe's main soya beans supplier with imports up by 112%. European Commission - European Commission Available at https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_19_161
- Foltyn, M., V. Rada, M. Lichovnikova, and E. Dračková. 2013. Effect of corn DDGS on broilers performance and meat quality. *Acta Univ. Agric. et Silvic. Mendelianae Brun.* 61:59–64.
- Gopinger, E., E. G. Xavier, M. C. Elias, A. a. S. Catalan, M. L. S. Castro, A. P. Nunes, and V. F. B. Roll. 2014. The effect of different dietary levels of canola meal on growth performance, nutrient digestibility, and gut morphology of broiler chickens. *Poult. Sci.* 93:1130–1136.
- Howie, J. A., Tolkamp, B. J., Avendano, S., and I. Kyriazakis. 2009. The structure of feeding behavior in commercial broiler lines selected for different growth rates. *Poult. Sci.* 88:1143-1150.
- Huynh-Tran, V. H., H. Gilbert, and I. David. 2017. Genetic structured antedependence and random regression models applied to the longitudinal feed conversion ratio in growing Large White pigs. *J. Anim. Sci.*95:4752–4763.
- ITAVI. 2016. Performances techniques et coûts de production - Résultats 2015. Available at <https://www.itavi.asso.fr/content/performances-techniques-et-couts-de-production-resultats-2015>
- Jensen, E. S., M. B. Peoples, and H. Hauggaard-Nielsen. 2010. Faba bean in cropping systems. *Field Crops Res.*115:203–216.
- Koivunen, E., K. Partanen, S. Perttila, S. Palander, P. Tuunainen, and J. Valaja. 2016. Digestibility and energy value of pea (*Pisum sativum* L.), faba bean (*Vicia faba* L.) and blue lupin (narrow-leaf) (*Lupinus angustifolius*) seeds in broilers. *Anim. Feed Sci. Technol.* 218:120–127.
- Lathuillière, M. J., E. J. Miranda, C. Bulle, E. G. Couto, and M. S. Johnson. 2017. Land occupation and transformation impacts of soybean production in Southern Amazonia, Brazil. *J. Clean. Prod.*149:680–689.
- Laudadio, V., E. Bastoni, M. Introna, and V. Tufarelli. 2013. Production of low-fiber sunflower (*Helianthus annuus* L.) meal by micronization and air classification processes. *CYTA J Food*11:398–403.
- Le Bihan-Duval, E., M. Debut, C. M. Berri, N. Sellier, V. Sante-Lhoutellier, Y. Jego, and C. Beaumont. 2008. Chicken meat quality: genetic variability and relationship with growth and muscle characteristics. *BMC Genet.* 10:53.

- Leinonen, I., A. G. Williams, A. H. Waller, and I. Kyriazakis. 2013. Comparing the environmental impacts of alternative protein crops in poultry diets: The consequences of uncertainty. *Agric. Syst.* 121:33–42.
- Leinonen, I., and I. Kyriazakis. 2016. How can we improve the environmental sustainability of poultry production? *Proc Nutr Soc* 75:265–273.
- Lessire, M., B. Méda, L. Dusart, J.-M. Hallouis, T. Bordeau, C. Souchet, F. Mercierand, C. Hatté, I. Bouvarel, and C. Berri. 2015. Remplacement du tourteau de soja par des matières premières riches en protéines : évaluation multicritère chez le poulet de chair à croissance intermédiaire.
- Méda, B., L. Dusart, M. Lessire, J.-M. Hallouis, T. Bordeau, C. Souchet, F. Mercierand, C. Hatté, I. Bouvarel, and C. Berri. 2015. Remplacement du tourteau de soja par des matières premières riches en protéines : évaluation multicritère chez le poulet de chair de type label rouge.
- Mendes, M., and E. Akkartal. 2007. Canonical correlation analysis for studying the relationships between pre- and post-slaughter traits of Ross 308 broiler chickens. *Arch. Geflügelkd.* 71:267–271.
- Molenaar, R., I. a. M. Reijrink, R. Meijerhof, and H. van den Brand. 2009. Correlation Between Chick Length and Chick Weight at Hatch and Slaughter Weight and Breast Yield in Broilers. Pages 446–446 in *Biology of Breeding Poultry*. Hocking, P.M., ed. Cabi Publishing-C a B Int, Wallingford.
- Nassiri Moghaddam, H., S. Salari, J. Arshami, A. Golian, and M. Maleki. 2012. Evaluation of the nutritional value of sunflower meal and its effect on performance, digestive enzyme activity, organ weight, and histological alterations of the intestinal villi of broiler chickens. *J Appl Poultry Res* 21:293–304.
- Nguyen, T. T. H., I. Bouvarel, P. Ponchant, and H. M. G. van der Werf. 2012. Using environmental constraints to formulate low-impact poultry feeds. *J. Clean. Prod.* 28:215–224.
- Plavnik, I., B. Macovsky, and D. Sklan. 2002. Effect of feeding whole wheat on performance of broiler chickens. *Anim Feed Sci Tech* 96:229–236.
- Santos, F. B. O., B. W. Sheldon, A. A. Santos, and P. R. Ferket. 2008. Influence of Housing System, Grain Type, and Particle Size on Salmonella Colonization and Shedding of Broilers Fed Triticale or Corn-Soybean Meal Diets¹. *Poult. Sci.* 87:405–420.
- SAS Institute Inc. 2013. SAS/STAT® 13.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.

- Simsek, U. G., M. Erisir, M. Ciftci, and P. Tatli Seven. 2014. Effects of Cage and Floor Housing Systems on Fattening Performance, Oxidative Stress and Carcass Defects in Broiler Chicken. *Kafkas Univ. Vet. Fak. Derg.* 20:727–733.
- Team, R. C. 2013. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria.
- Toghyani, M., S. B. Wu, R. A. Pérez-Maldonado, P. A. Iji, and R. A. Swick. 2017. Performance, nutrient utilization, and energy partitioning in broiler chickens offered high canola meal diets supplemented with multicomponent carbohydrase and mono-component protease. *Poult. Sci.* 96:3960–3972.
- Tu, X., S. Du, L. Tang, H. Xin, and B. Wood. 2011. A real-time automated system for monitoring individual feed intake and body weight of group housed turkeys. *Comput Electron Agr* 75:313–320.
- Van Horne, P.L.M.. 2018. Competitiveness of the EU poultry meat sector, base year 2017; International comparison of production costs. Report 2018-116, Wageningen, Wageningen Economic Research, 40 pp. https://www.avec-poultry.eu/wp-content/uploads/2018/12/WUR-report-2018-116-Competitiveness-EU-poultry-meat-PvanHorne_def.pdf
- Yan, W., C. Sun, C. Wen, C. Ji, D. Zhang, and N. Yang. 2019. Relationships between feeding behaviors and performance traits in slow-growing yellow broilers. *Poult. Sci.* 98:548–555.
- Zhao, X., W. Ren, P. B. Siegel, J. Li, H. Yin, Y. Liu, Y. Wang, Y. Zhang, C. F. Honaker, and Q. Zhu. 2015. Housing systems interacting with sex and genetic line affect broiler growth and carcass traits. *Poult. Sci.* 94:1711–1717.

Résumé des principaux résultats et conclusions

Validation de l'automate BIRD-e - Cette étude a permis de valider la précision de l'automate BIRD-e. En effet, des pesées manuelles ont été ajoutées pendant l'expérience et l'écart entre les pesées manuelles et les poids fournis par l'automate sont faibles, de l'ordre de 2.2%. Pour la consommation alimentaire, la différence de poids d'aliment dans l'automate d'un jour à l'autre correspond bien à la somme des consommations alimentaires calculées pendant cette même journée, l'écart étant d'environ 0.3%.

Capacité d'adaptation des animaux au régime alternatif - Les deux souches présentent une bonne adaptation au régime alternatif, avec des performances finales moyennes (poids, indice de consommation, rendement en filet) comparables entre les deux régimes. Seul le rendement en cuisse des poulets label, le pH ultime du filet et le pourcentage de gras abdominal des poulets standards est légèrement plus favorable avec le régime alternatif. En outre, la variabilité de consommation et d'efficacité alimentaire journalière dans les lots nourris avec le régime alternatif est plus faible que celle des animaux nourris avec le régime classique. L'homogénéité de performances sera donc meilleure avec le régime alternatif. Il n'y a donc pas d'obstacle au recours à des régimes alimentaires alternatifs.

Importance des périodes de transition alimentaire - Les différences entre régimes apparaissent majoritairement autour des transitions alimentaires. Ces différences entre régimes apparaissent plus faibles pour certains caractères (poids vif des labels) mais plus importantes pour d'autres (gain de poids des animaux standards). Ces fluctuations autour des transitions peuvent amener à changer les âges auxquels sont pratiquées ces transitions, trop précoces ou trop tardives selon les cas.

Indicateurs précoces des performances finales – Les cinétiques de corrélations phénotypiques entre caractères journaliers et finaux montrent que l'efficacité alimentaire en début de croissance permet d'avoir un bon prédicteur du rendement en filet d'animaux label.

CHAPITRE 4 : Déterminisme génétique des caractères de croissance, de consommation et d'efficacité alimentaire quotidiens chez le poulet de chair nourri avec un aliment alternatif

L'étude précédente nous a permis de montrer que les animaux pouvaient s'adapter à un régime alternatif, que ce soit au niveau des performances moyennes ou de l'homogénéité du lot. Pour ce dernier critère, l'intérêt du régime alternatif était particulièrement prononcé pour les animaux à croissance rapide. De plus, les corrélations phénotypiques entre caractères journaliers et performances finales suggéraient que les données d'efficacité alimentaire précoces pouvaient être de bons indicateurs des performances finales.

Afin de valider quels critères pourraient éventuellement être utilisables en sélection, il était nécessaire d'en **étudier le déterminisme génétique. Dans cette partie, nous avons donc estimé l'héritabilité des données quotidiennes de consommation alimentaire, d'efficacité alimentaire et de croissance ainsi que leurs corrélations avec les caractères d'abattage (rendement en filet, qualité de la viande), dans le cas de l'utilisation d'un régime alternatif.** L'étude a été menée sur des animaux à croissance rapide, pour lesquels le bénéfice du recours au régime alternatif en termes d'homogénéité de performances est plus important. Enfin, le pH ultime du filet étant un des seuls caractères de qualité de la viande affecté par le régime alternatif dans la souche à croissance rapide utilisée dans le chapitre 2, nous avons choisi d'effectuer notre étude génétique sur 2 lignées expérimentales divergentes sur le pH ultime du filet (pHu).

Ces lignées sont sélectionnées depuis 2009 pour un fort (pHu+) ou faible (pHu-) pH ultime de la viande du filet mesuré 24h après abattage (Alnahhas et al., 2014, 2015). A la 13^{ème} génération de sélection, le pHu moyen de ces lignées était de 6.15 chez les pHu+ et de 5.45 chez les pHu- (Figure 4.1). Chez le poulet, il existe une corrélation génétique extrêmement forte et négative (-0.97) entre pH ultime et potentiel glycolytique du filet (Le Bihan-Duval et al., 2008). La sélection divergente pour le pH ultime se traduit donc par des réserves en glycogène plus importantes dans la lignée pHu- que dans la lignée pHu+ (Alnahhas et al., 2014). La

caractérisation de ces deux lignées divergentes a montré que la production d'énergie est majoritairement basée sur le métabolisme glycolytique et l'utilisation des sucres chez les pHu, alors que les pHu+ mettent en œuvre des voies alternatives telles que le catabolisme des protéines et l'oxydation des lipides (Beauclercq et al., 2016, 2017).

Cette sélection divergente a également induit de nombreuses réponses sur la qualité de la viande et de la carcasse (Alnahhas et al., 2014, 2015). Au niveau technologique, les résultats sont en faveur des animaux de la lignée pHu+ dont la viande présente un rendement technologique et un pouvoir de rétention d'eau nettement plus élevés que les pHu-. Au plan sensoriel, les filets des pHu+ sont moins pâles et jugés plus tendres et avec un goût acide moins prononcé que ceux des pHu-. La sélection pour une augmentation du pHu s'accompagne d'une augmentation du rendement en viande (filet et cuisse) sans modification de l'engraissement abdominal. L'augmentation du pH ultime apparaît par ailleurs comme un facteur prédisposant au développement de défauts musculaires tel que le white stripping, en recrudescence chez le poulet (Alnahhas et al., 2016).

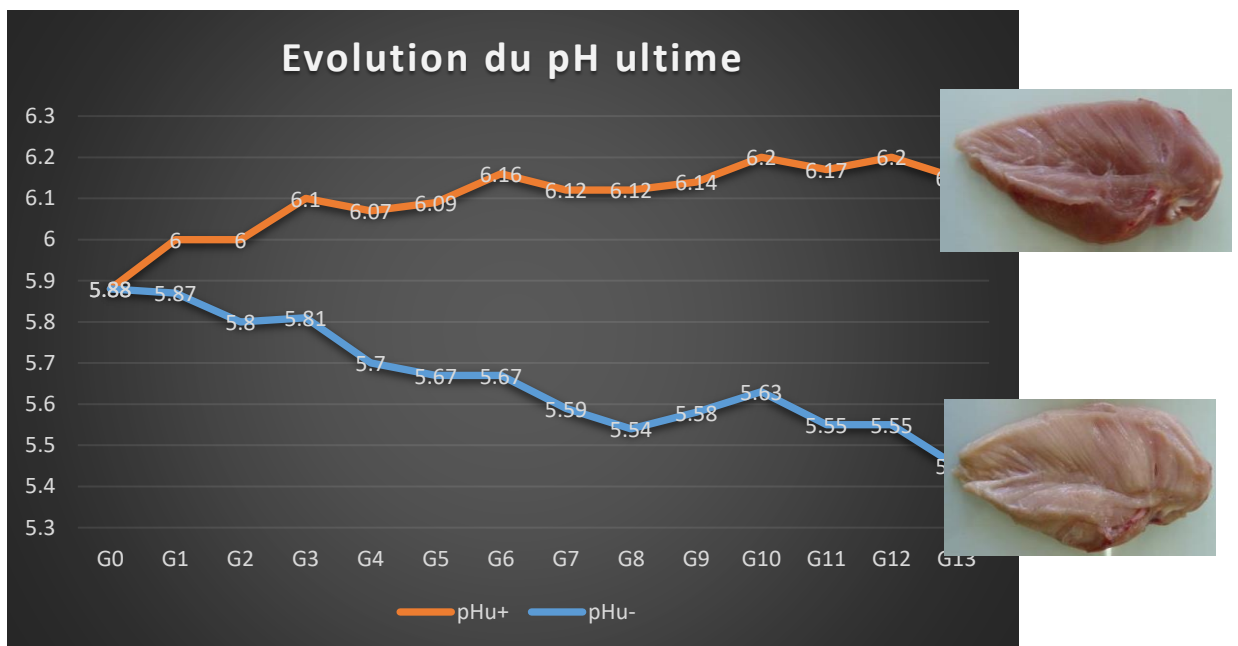


Figure 4.1. Evolution du pH ultime au sein des deux lignées divergentes de poulet

L'expérimentation était intégrée dans le projet européen H2020 Feed-a-Gene (2015-2020, numéro 633531) coordonné par Jaap van Milgen (INRAE, UMR PEGASE).

Les résultats de cette deuxième partie ont fait l'objet d'une publication en révision dans BMC Genomic Data (Berger et al., 2021) et d'une communication orale au congrès mondial d'aviculture de Paris (Berger et al., 2022).

Profiles of genetic parameters of body weight and feed efficiency in two divergent broiler lines for meat ultimate pH

Quentin Berger¹, Elodie Guettier¹, Jérémy Bernard², Patrice Ganier², Marine Chahnamian², Elisabeth Le Bihan-Duval¹, Sandrine Mignon-Grasteau^{*,1}

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

² INRAE, PEAT, 37380 Nouzilly, France

*Corresponding author: Sandrine Mignon-Grasteau

Email: sandrine.grasteau@inrae.fr

Address: INRAE, Université de Tours, BOA, 37380 Nouzilly, France

Phone Number: +33247427691

Abstract

Background: Selection for feed efficiency is one of the best ways to decrease poultry production costs and environmental impacts. While literature on its genetic determinism is abundant, it is limited to one or a few periodic values over the animals' lifespans. With the development of new phenotyping tools, kinetics of growth and feed intake are now available, providing access to daily data on feed efficiency. In this study, over the course of 6 weeks, we described the kinetics of body weight (BW), average daily weight gain (ADG), feed intake (FI), and daily cumulative feed conversion ratio (DCFCR) using electronic feed stations. We then estimated the genetic parameters of daily data in two fast growing lines of chicken divergently selected for breast meat ultimate pH (heritability and genetic correlations with breast meat yield and pH).

Results: Birds from the line selected to have a more acidic meat (pHu-), were more efficient than those selected to have a less acidic meat (pHu+), with a 4.3% higher BW from d7 to d29 and 5.0% lower feed efficiency from d12 to slaughter. The line effect for ADG and DCFCR appeared to be significant as early as d5, which is consistent with the early age at which metabolic differences between the two lines appear. Genetic parameters estimated within each line revealed different genetic determinisms of growth and feed efficiency, with a higher impact of maternal effects on BW during the growing phase (d10 to d20) in the pHu+ line and much higher heritability values of DCFCR during the finishing phase (d26-d42) in the pHu- line.

Conclusion: Genetic profiles of daily performance highlighted the difference between both lines. Their behavior during dietary transitions reinforced the already known impact of these periods in the animals' lives. Based on the profiles of genetic parameters within each line, it seems feasible to identify early criteria for selecting feed efficiency, but they must be defined for each line, as the genetic determinism of these traits is line-dependent.

Keywords: Kinetics, growth, feed efficiency, genetic determinism, broiler, alternative feedstuff, meat quality

Background

Feed efficiency has been one of the most important criteria of selection in poultry for decades because of its economic importance and benefits for the environmental impact of poultry production [1]. In the US context, with an annual production of $19.5 \cdot 10^9$ tons of poultry meat, Abasht et al. [2] estimated that a 1% reduction in feed conversion ratio would result in a savings of \$ $294 \cdot 10^6$ on broiler feed and saving reduction of $0.53 \cdot 10^6$ tons of fresh manure produced. Improving feed conversion ratio in a context of diversifying feedstuffs is also a way to reduce the social impact of poultry production. It can make it possible to increase the

proportion of local or less concentrated feedstuffs and agricultural by-products in poultry diets, reducing importations of soybean into Europe [3] and competition between human and animals for lands and cereals [4-6].

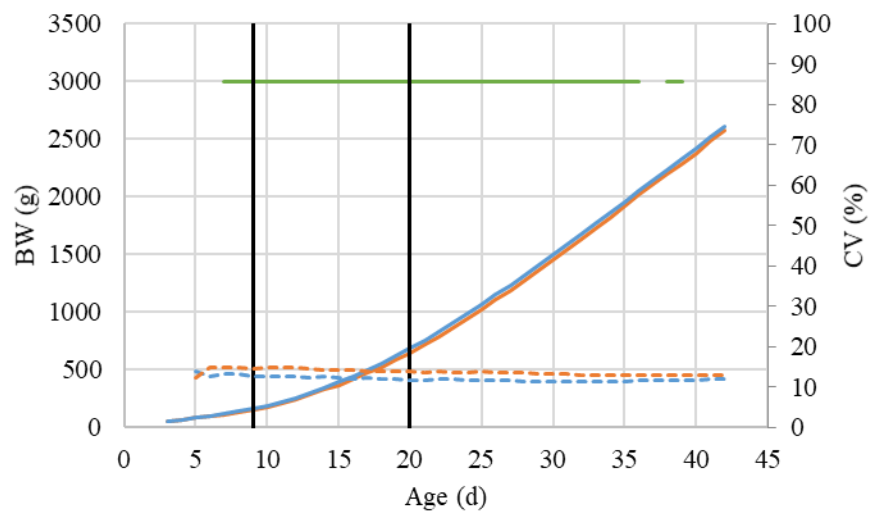
Literature on the genetic determinism of feed efficiency is abundant. Estimates of heritability vary largely depending on the periods studied and the strains. For example, heritability estimates for feed conversion ratio at 42 d vary from 0.13 to 0.41 depending on the strains and on the duration of data collection [4, 7-10]. Estimates are generally lower in commercial lines than in random-bred or crossbred lines. Data from the literature also indicate that heritability of feed conversion ratio tends to decrease with age [2]. Despite this obvious effect of age, most of the literature on the genetics of feed efficiency has been concentrated on the last part of the production cycle, and has relied on one or a few data of feed efficiency calculated over periods of one to 6 weeks.

Thanks to recent developments in the phenotyping of feed consumption and animal weight, it is now possible to have access to the kinetics of animal growth and feed efficiency. Thus, using the BIRD-e electronic feeder that provides daily data of feed intake and body weight on individuals raised on the floor [11-12], Berger et al. [4] described the response of slow- or fast-growing chickens to conventional or alternative diets. Their work highlighted several interesting points such as the importance of transition periods around diet changes and the impact of early growth or feed efficiency parameters on the final performance of birds, including body composition and meat quality.

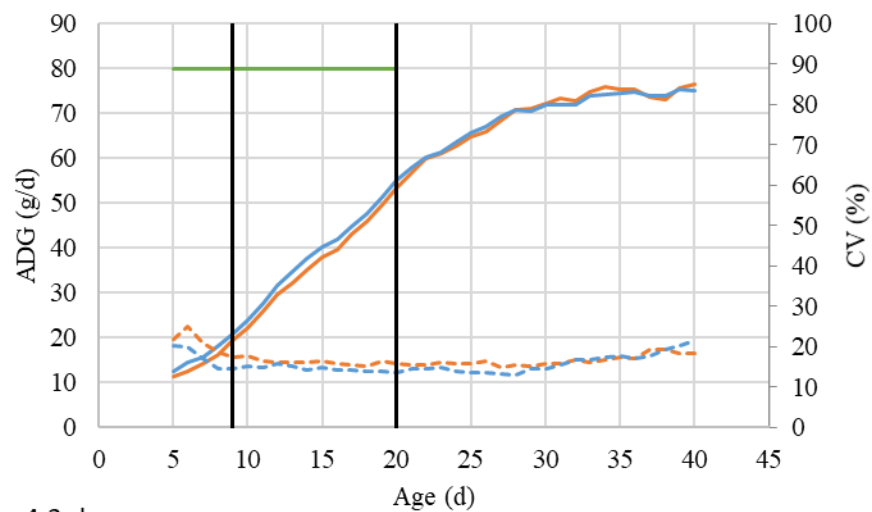
These new phenotyping tools make it possible to revisit the genetic study of feed efficiency in chickens and to optimize the search for selection criteria by considering the kinetics of daily data. The objective of this study was thus to describe the evolution profile of genetic parameters of body weight, feed intake and feed conversion ratio in fast-growing chickens, in a context feedstuffs diversification. Animals were thus fed with a diet containing the same amount of energy and proteins than usual diets, but including alternative feedstuffs to soybean, produced locally and less in competition with human food. Feed efficiency depends on many factors such as basal metabolism, protein turnover, body composition, and digestive efficiency [2]. A link with meat quality traits such as wooden breast defect was also recently reported [13]. In the current study, we relied on two lines of fast-growing broilers divergently selected for breast meat ultimate pH [14], in order to study the genetic control of the kinetics of body weight and feed efficiency in birds with different metabolic profiles and meat quality.

Figure 4.2. Kinetics of BW (2a), ADG (2b), DFI (2c), and DCFCR (2d) in both chicken lines.

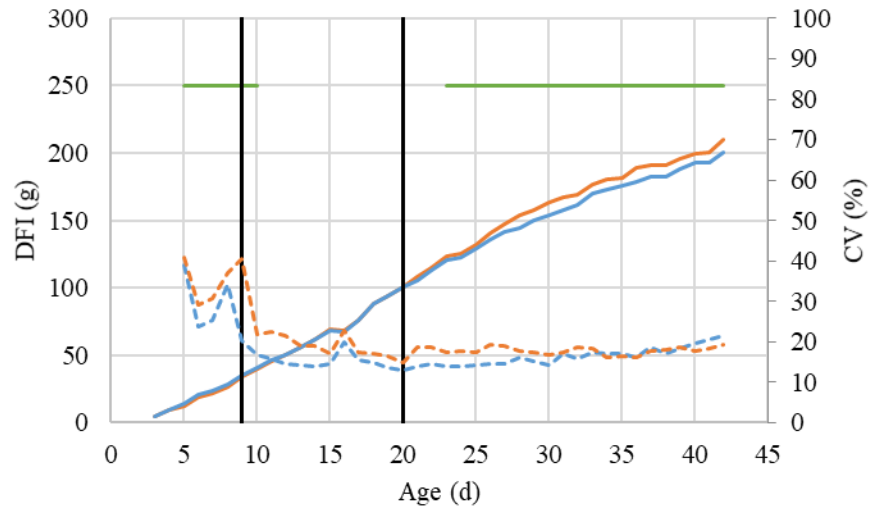
4.2.a



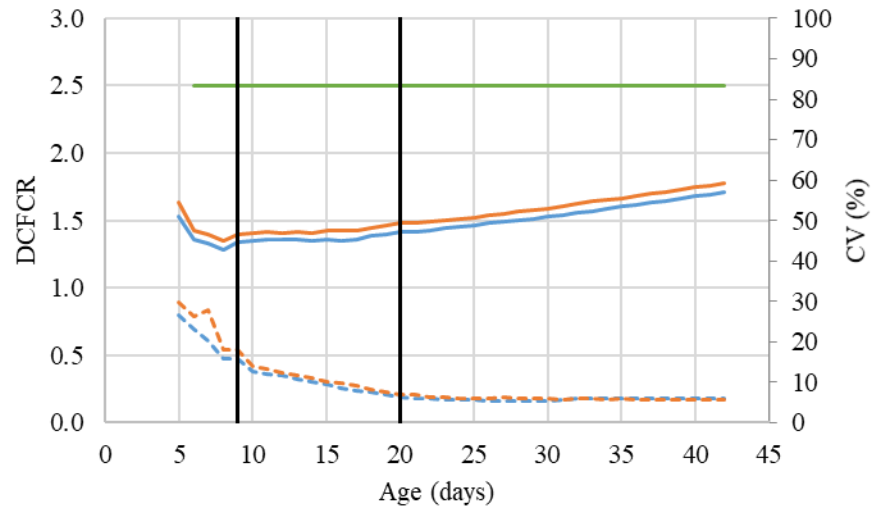
4.2.b



4.2.c



4.2.d



- Mean : pHu- line
- Mean : pHu+ line
- - - Coefficient of variation : pHu- line
- - - Coefficient of variation : pHu+ line
- Significant line effect
- | Diet changes

Results

Line effect on phenotypic performance

As expected from the selection performed on these divergent lines, breast meat ultimate pH at 42 d was much lower in the pHu- line than in the pHu+ line (5.58 ± 0.12 vs 6.21 ± 0.14 , $P=0.001$). Breast meat yield (BMY) was also 3.5% lower in the pHu- line than in the pHu+ line (18.83 ± 1.54 vs 19.51 ± 1.82 , $P=0.001$).

The line effect on daily performance is shown in Figure 4.2 and detailed statistics can be found in Supplementary Tables 4.1 and 4.2. Line effect was significant from 8 to 36 days for BW, from 5 to 20 days for ADG, from 5 to 10 days and from 23 to 42 days for DFI, and from 6 to 42 days for DCFCR. During these periods, pHu- birds showed better performance than those from the pHu+ line (7.3% higher ADG, 4.3% higher BW, and 4.2% lower DCFCR). The ranking of both lines changed for DFI between the first period (5-10 d), during which pHu+ birds had a 9.1% lower feed intake, and the second period (23-42 d) during which pHu- birds ate 4.3% less than pHu+ birds.

For all daily traits, pHu+ performance was more variable than pHu- performance, as shown by larger coefficients of variation reported in Figure 4.2. For growth traits, the performance variability of both lines was constant throughout the entire period (with CV comprised between 11 and 25%), while the variability of feed intake and feed efficiency was much higher before the first change of diet (CV from 15.7 to 38.8%) than after (CV from 5.3 to 21%).

Heritability estimates for daily performance and slaughter traits

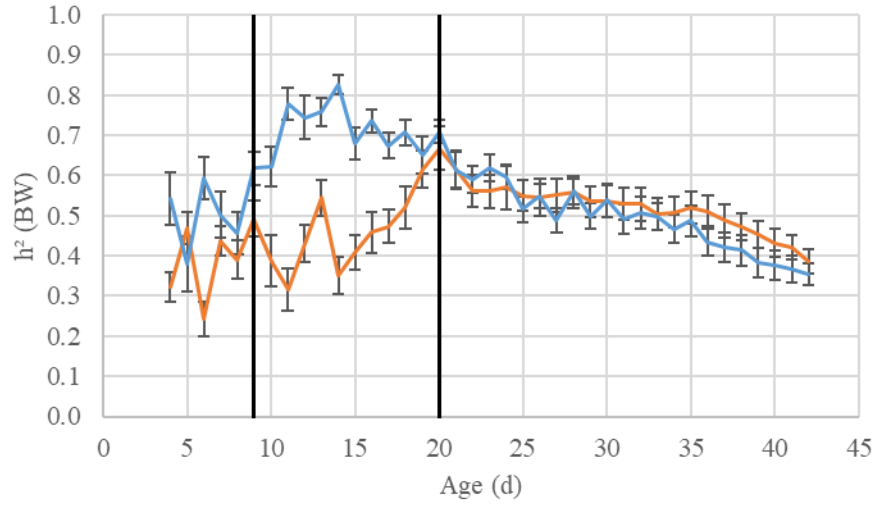
Heritability of pHu and BMY were quite significant and close in the two lines (pHu: 0.55 ± 0.03 in pHu- and 0.58 ± 0.03 in pHu+, BMY: 0.59 ± 0.03 in pHu+ and 0.54 ± 0.03 in pHu-).

Heritability estimates of daily performance are presented in Figure 4.3 and Supplementary table 5.3. Heritability of DCFCR (Figure 4.3d) increased with age for both lines, until 26 days for pHu+ and 30 days for pHu-. Then it remained stable around 0.57 for the pHu- line and slightly decreased to stabilize around 0.30-0.35 for the pHu+ line.

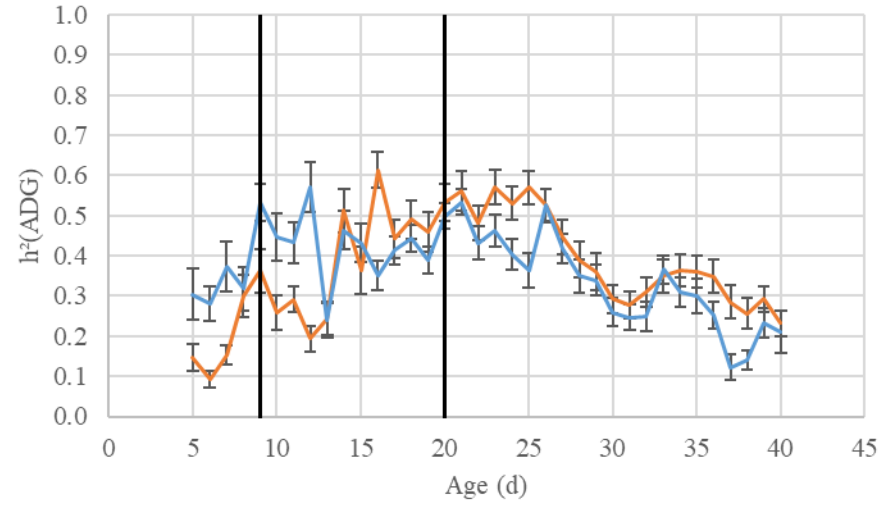
Heritability of ADG and DFI showed comparable kinetics (Figure 4.3.b, c). Before 26 d, heritability tended to increase in the pHu+ line whereas it was stable in the pHu- line. After 26 d, heritability estimates decreased in both lines for ADG. For DFI, it decreased to 0.11 for pHu+ whereas it remained stable around 0.25 for the heritability of DFI for pHu-. The largest difference in heritability between the two lines for both traits occurred on the 8 days after the second change of diet.

Figure 4.3. Heritability estimates (+ 1 standard error) of (3.a) BW, (3.b) ADG, (3.c) DFI, and (3.d) DCFCR.

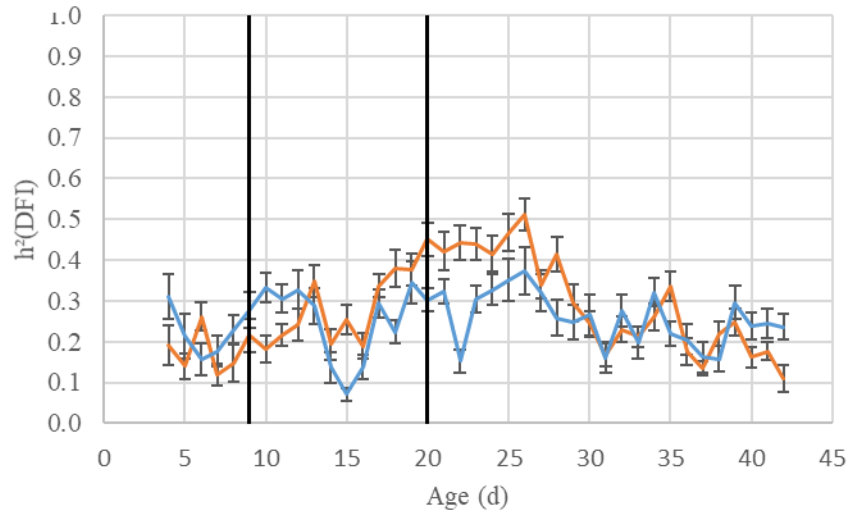
4.3.a



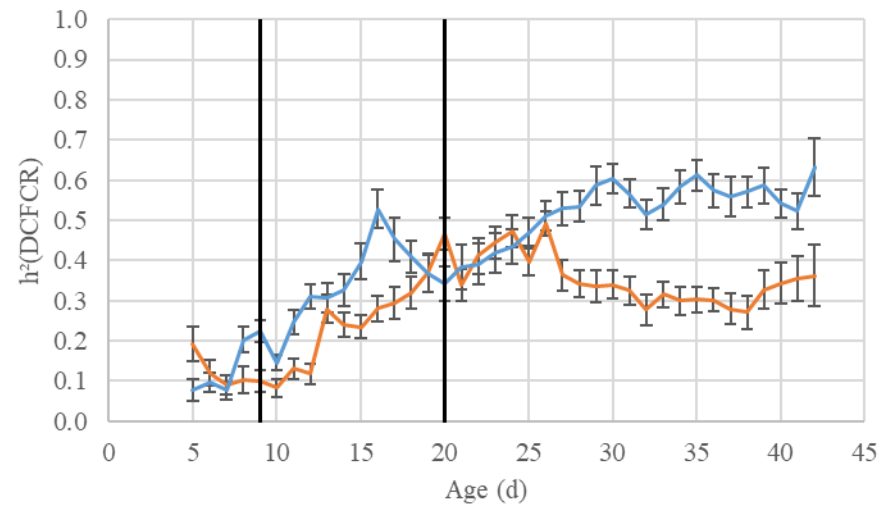
4.3.b



4.3.c



4.3.d



— pHu- line
— pHu+ line
— Diet changes

Finally, for BW, heritability increased until 14 d for pHu- and 20 d for the pHu+ line, estimates being 14 to 146% higher for pHu- (Figure 4.3a). After this first age, heritability estimates from both lines decreased until 42 d and remained close between the two lines, with slightly higher values after 35 days in the pHu+ line (9 to 13%).

Maternal effects on daily performance

Maternal effects did not exceed 0.07 for both lines for DCFCR and DFI and nearly disappeared after the first diet change for DCFCR and the second diet change for DFI (Figure 4.4c, d). In contrast, maternal effects reached higher values and remained present later for BW and ADG (Figure 4.4.a, b), especially in the pHu+ line. For both traits, maximum values were reached for pHu+ animals between the two diet changes (0.10 for ADG and 0.13 for BW). Maternal effects on BW in pHu- were lower (<0.08), but remained significant until 38 d.

Genetic correlations

Correlations between final cumulative feed conversion ratio and daily performance

Genetic correlations between final cumulative feed conversion ratio (DCFCR₄₂) and daily traits are reported in Figure 4.5 and Supplementary table 5.4. As expected, the genetic correlation between daily and final cumulative FCR increased with age. It reached strong values before the first diet change in pHu- (>0.8) and just after in pHu+ (>0.7), suggesting that feed efficiency recorded around the first diet change is an early predictor of final feed efficiency. In contrast, correlations between DCFCR₄₂ and body weight were low throughout the whole period in both lines (0.17 in pHu+ and -0.02 in pHu- on average).

Profiles of correlations between DFI and DCFCR₄₂ varied more between the two lines. Two periods of stability occurred for pHu+. The first one occurred between day 5 and day 13 and showed values around 0.62. The second one was between day 15 and slaughter, and showed values around 0.4. The correlation between DFI and DCFCR₄₂ in pHu- was more variable, increasing to 0.7 before the first change of diet and decreasing to 0.2 the day after. After this change, the correlation remained stable until 22 days. Then it increased strongly to 0.72 at 29 days and finally decreased to 0.2 in the last days. The line difference could also be seen in the correlations between DCFCR₄₂ and ADG. Thus, the correlation within the pHu+ line remained stable and low during the whole life of the chickens (0.10 on average), whereas this correlation showed a decrease after 27 days in the pHu- line. Average correlation values were equal to 0.04 before 27 d and -0.32 after 27 d, indicating that in pHu- a lower efficiency was associated with a decreased growth rate at later ages.

Figure 4.4. Maternal permanent environment effect (c^2) on (4.a) BW, (4.b) ADG, (4.c) DFI, and (4.4d) DCFCR.

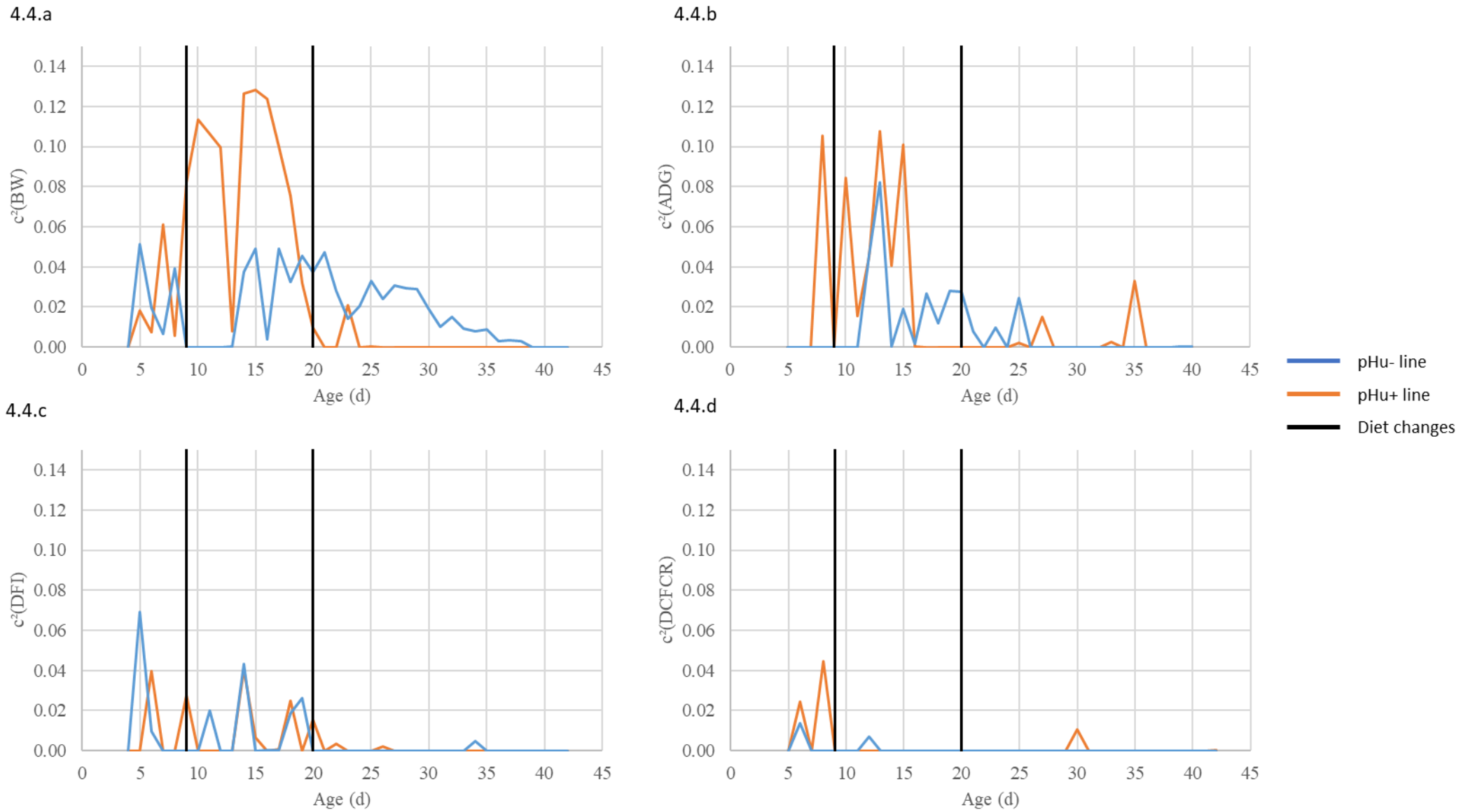


Table 4.1. Body composition and meat characteristics of label rouge (LR) and Cobb500 (STD) genotypes fed with either the alternative diet or the classical diet.

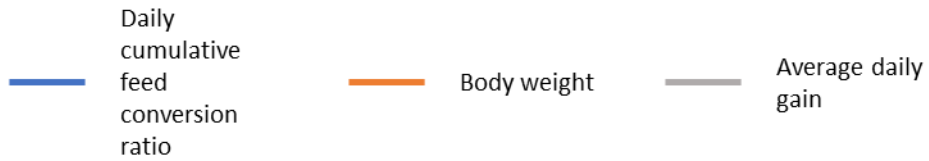
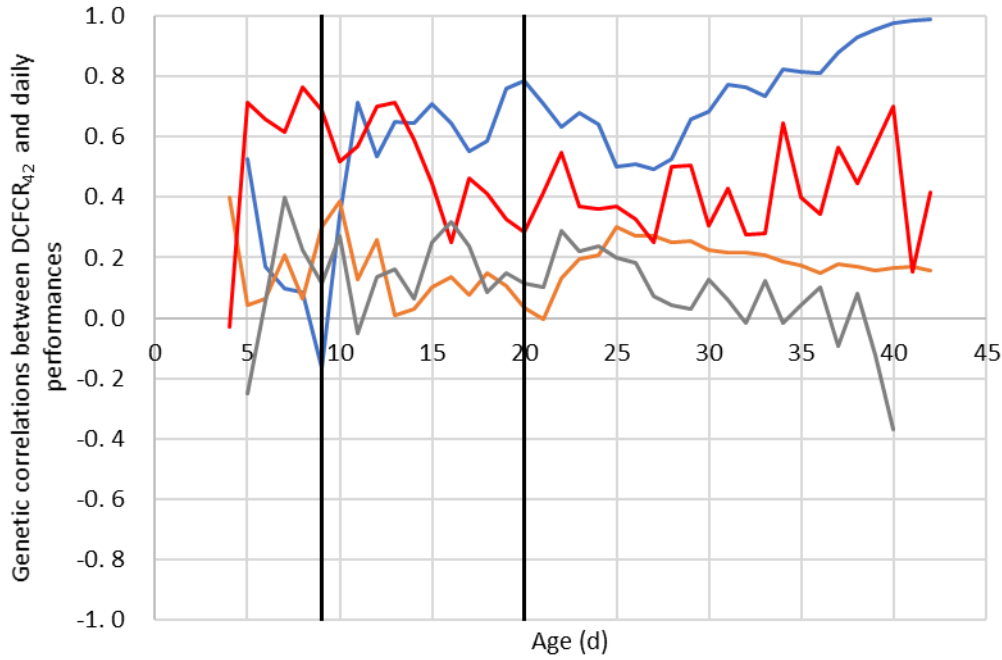
Trait ¹	Genotype	LS Means		P-value of diet effect
		Diet ²		
		AD	CD	
Slaughter weight (g)	LR	3010	2951	0.371
	STD	2334	2355	0.720
AFY (%)	LR	3.53	3.95	0.080
	STD	1.57	1.83	0.001
BMY (%)	LR	14.56	14.40	0.550
	STD	20.44	20.40	0.970
TY (%)	LR	25.64	25.16	0.030
	STD	22.58	22.94	0.100
L*	LR	48.76	49.14	0.520
	STD	47.99	47.38	0.250
a*	LR	-1.06	-1.09	0.860
	STD	-0.51	-0.72	0.100
b*	LR	9.82	9.48	0.230
	STD	8.02	8.89	0.001
pHu	LR	5.74	5.72	0.350
	STD	5.89	5.79	0.001

¹ AFY: abdominal fat yield, BMY: breast muscle yield, TY: thigh yield, L*: breast meat luminance, a*: breast meat redness, b*: breast meat yellowness, pHu: breast meat pH 24 h after slaughter

² AD: alternative diet; CD: control die

Figure 4.5 .Kinetics of genetic correlations between (DCFCR₄₂) and daily performance for pHu+ (5.4.a) and pHu- (5.4.b).
DCFCR₄₂ is for final cumulative feed conversion ratio.

4.5.a



4.5.b

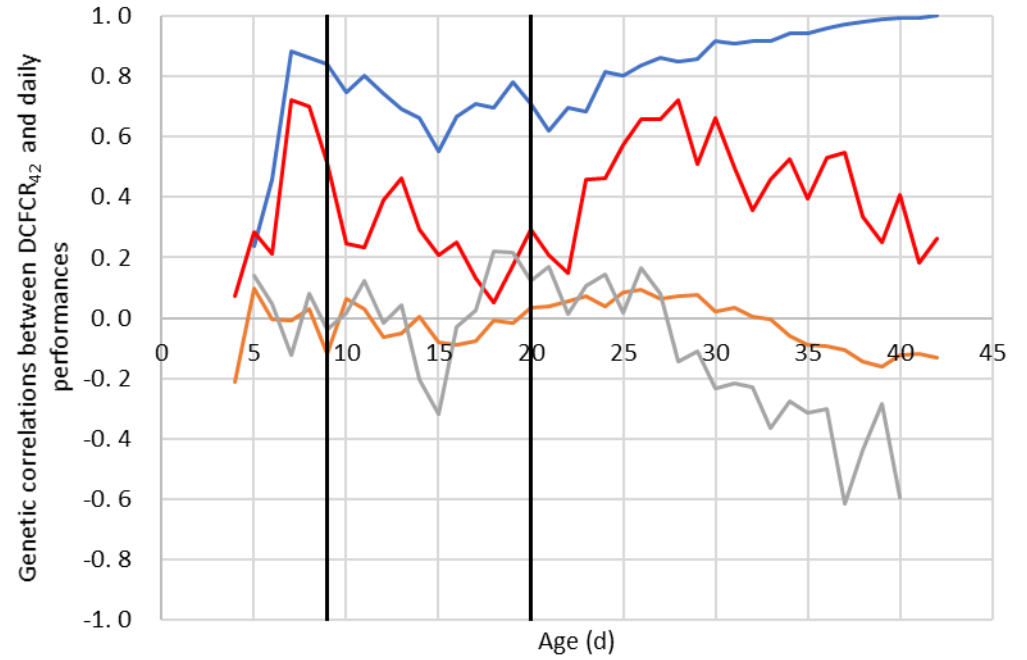
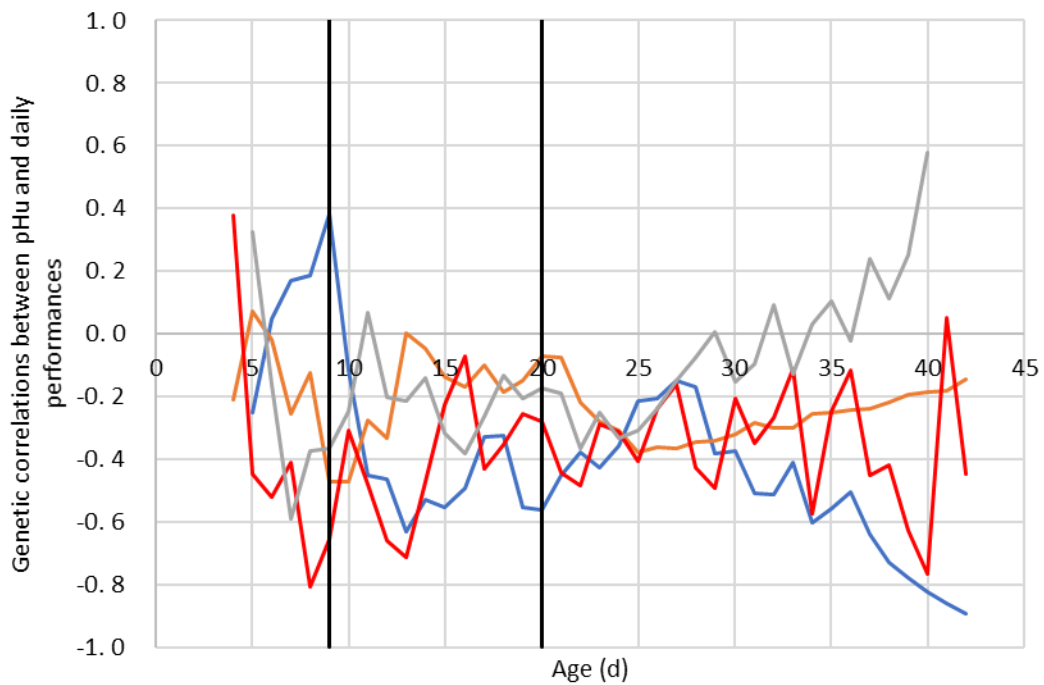
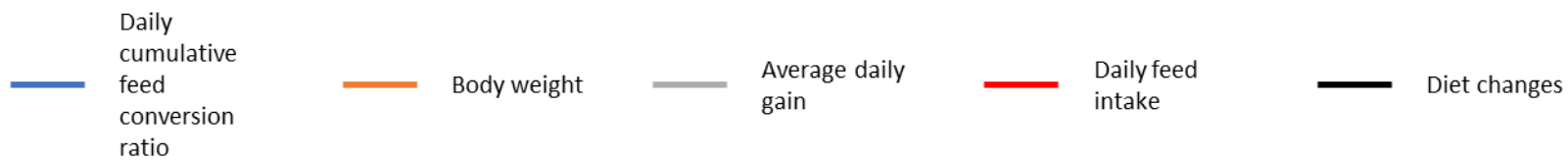
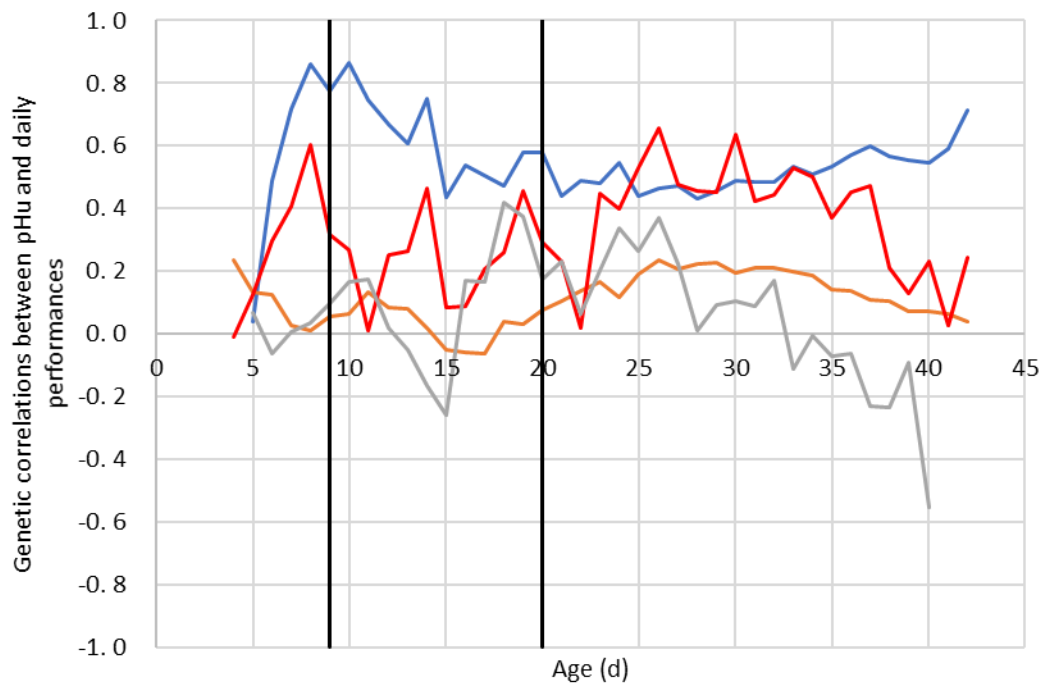


Figure 4.6. Kinetics of genetic correlations between pHu and daily performance for pHu+ (4.6.a) and pHu- (4.6.b).

4.6.a



4.6.b



Correlation between pHu and daily performance

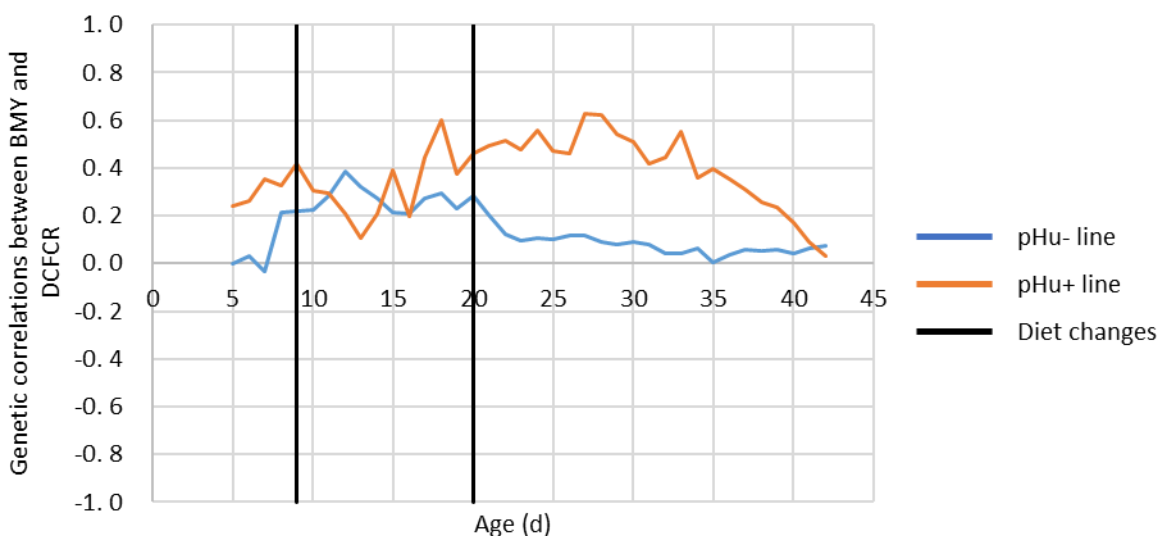
Genetic correlations between the criteria of selection, breast meat ultimate pH, and daily traits are reported in Figure 4.6 and Supplementary table 5.5. Since the lines had been divergently selected for pHu, different patterns of correlations between pHu and growth or feed efficiency traits could be expected between the two lines. Indeed, for most correlations, the signs of correlations were different in the two lines. For example, correlations between BW or DFI and pHu were low and negative in pHu+ ($\mu=-0.23$ and -0.37 , respectively), but low and positive in pHu- ($\mu=+0.11$ and $+0.33$, respectively). Regarding the correlation between ADG and pHu, the difference of pattern between lines was marked after the second diet change, as this correlation increased from -0.24 to $+0.58$ in pHu+, but decreased from $+0.37$ to -0.56 in pHu-.

The correlation between DCFCR and pHu increased in both lines from hatch to the first diet change (to $+0.38$ for pHu+ and $+0.80$ for pHu-). After this event, the correlation for pHu+ decreased down to -0.6 at 13 days and remained stable until the second diet change. Finally, the correlation increased slowly up to -0.15 at 28 days. From 29 d until the end, it decreased to reach -0.89 . The correlation for pHu- was more stable, decreasing after the first change of diet and being stable from 15 to 30 days, at around $+0.53$. After this day, it increased and reached $+0.71$ at 42 days.

Correlation between BMY and DCFCR

Figure 4.7 and Supplementary table 5.6 contain the genetic correlations between DCFCR and BMY. For the pHu- birds, this correlation first increased from 0 to 0.38 until 12 d and then decreased until 42 d, being close to 0 at the end. In comparison, the correlation for pHu+ showed 3 phases: from 0 to 16 d around 0.2-0.4, from 17 to 28 d between 0.4 and 0.6, and from 29 d to slaughter a decrease until 0.

Figure 4.7. Kinetics of genetic correlations between BMY and the DCFCR for both lines.



Discussion

This study made it possible to give a detailed description of the kinetics of growth and feed efficiency in the two divergent lines for breast meat ultimate pH. While the weight of chicks was higher at hatching in the pHu+ line (40.9 vs 38.4, $P < 0.001$), their daily feed intake was lower in the first days of life so that BW became similar between the two lines at 5 d. As ultimate pH and muscle glycogen stores are highly genetically correlated at slaughter age (-0.97) [15], selection applied to pHu modified glycogen levels between pHu+ and pHu- broiler chickens [14, 16]. This difference was found to be already present at hatch, with a higher glycogen content in the breast and pipping muscles of pHu- chicks [17]. These early metabolic differences are accompanied by a lower quality of pHu+ chicks [18] estimated according to the Tona's grid [19]. In poor quality chicks, the starting phase seems more difficult with an altered feed intake in the first days of life and a lower average daily gain continuing up to 3 weeks of age, as evidenced in the current study. As shown by transcriptomic and metabolomic analyses conducted at 6 weeks [20, 21], growing chickens from the two lines rely on different metabolic pathways to produce energy, with an intensive use of carbohydrate metabolism in the pHu- line and of muscle proteolysis and amino acid catabolism as well as lipid oxidation in the pHu+ line. In the current study, we showed that although the pHu+ birds consumed a higher amount of feed from 23 days onwards, they were characterized by a lower BW and 4% higher FCR, in consistency with their lower metabolic efficiency. At the same time, pHu+ birds had a higher breast yield at slaughter (19.5 vs 18.8, $P < 0.001$). Although a favorable relationship is usually observed between breast development and feed efficiency [1], this was not recovered in the pHu lines for which the higher protein deposition in the pHu+ line seems to be made at a higher energetic cost. This absence of correlation and the lower DCFCR heritability in pHu+ birds after the second change of diet may underline a difficulty for these animals to express fully their genetic potential. This could be due to the fact that the energetic needs are fulfilled by the diet for the pHu- birds but not for the less efficient pHu+ birds. For example, the Hubbard nutritional recommendations during the finishing phase vary between 2850 and 3200 kcal/kg [22]. Our diet is formulated at 2950 kcal/kg, which may be sufficient in pHu- but not in pHu+, whose needs may be closer to the upper values recommended. During this period, this lack of energy is compensated by an increased feed intake, leading to an identical growth in the two lines but to a higher DCFCR in pHu+ line. We can thus hypothesize that a more energetic diet would be more appropriate in the pHu+ line.

The current study also provided original results on the genetic determinism of the kinetics of growth and feed efficiency in chickens. While heritability of BW evolved in a similar way in the two lines from 20 days onwards, decreasing from high values of 0.7 to moderate values of 0.35-0.40, genetic controls of BW differed between the two lines in the first part of life. In particular, BW heritability was much lower between 10 d and 20 d in the pHu+ line. This may partly be due to maternal effects that greatly influenced BW variability during this period in the

pHu+ line, while they remained low in the pHu- line. In the current standardized conditions of poultry production, maternal effects are mainly mediated by egg characteristics. Factors such as egg size and nutrient content (vitamins, carotenoids, etc.) or maternal hormones can impact the development and the phenotypes linked to the fitness of the offspring [23]. The higher egg weight observed in the pHu+ line [17] might contribute to the higher maternal effects observed in this line, but additional studies are needed to evaluate if variations in nutrient and hormone contents in the eggs could also exist between the two lines.

In contrast to BW, the genetic difference between the two lines for feed efficiency was mostly present after 25 days, when heritability stabilized at a high value of 0.5-0.6 in the pHu- line and at a moderate value of 0.30 in the pHu+ line. A difference in the profiles of heritability of feed efficiency around diet transitions was also evidenced. Indeed, pHu+ heritability was quite stable around these periods, whereas pHu- showed a strong increase in heritability around the first transition and a sharp decrease before the second transition. The profiles of genetic correlations showed that, in both lines, maintenance costs were not decisive for feed efficiency, but that feed intake was the trait contributing the most to feed efficiency. However, after 30 d in the pHu- line, the influence of FI decreased in favor of weight gain. The difference in energetic metabolism between lines may contribute to these differences in genetic profiles. At the first transition, feed intake and body weight both increased linearly and needs may be fulfilled thanks to the increase of the ratio of energy to protein between the first and the second diet. In contrast, between 15 and 20 days, feed intake increase was still linear whereas growth was exponential. For pHu- birds, the ratio of energy to protein in the second diet may thus be limiting to fulfill animal needs until the last diet transition, after which heritability increased again and reached a higher value than in the pHu+ line.

Access to daily data can offer new opportunities to improve selection strategies for feed efficiency. At first, the profiles of genetic parameters can lead to identifying earlier predictors of the final feed efficiency. By combining information on heritability and genetic correlations, we compared expected response to a direct selection for the cumulative feed conversion ratio measured at slaughter age (i.e. $DCFCR_{42}$) to the indirect selection for the same indicator measured earlier. Given our experimental results, selection for $DCFCR$ could be envisaged as soon as 20 d in pHu+ birds and 29 d in pHu- birds with an expected response amounting to 80% of the maximum response that would be obtained by selecting for $DCFCR_{42}$. Whatever the scenario, the expected response would be higher in the pHu- line than in the pHu+ line (0.42 ± 0.14 and 0.21 ± 0.09 , respectively for pHu- and pHu+). Moreover, given the profiles of correlations with BMV and meat pH, improved FE would lead to an increased pH value and a decreased breast yield in the pHu+ line, but a more acidic meat without any correlated response on BMV in the pHu- line. This illustrated again the different genetic determinism of FE in the two lines.

Selection on feed conversion ratio with an alternative diet would improve the efficiency of the system by two ways 1) the improvement of FCR performance with a high economic impact or 2) at the same FCR, the spare of resources that could be used in human food. In a former study, we already showed that rapid growing chickens could reach similar performances with a classical corn-soybean diet than with an alternative diet [1]. We considered the proportion of energy and protein of each feedstuff that could be used for human food [24], the composition of our alternative diet and of the classical diet as used in Berger et al. [1], and the mean feed intake of starter, grower and finisher diets we got in the current study to calculate the quantity of human-edible energy and proteins that could be spared by using an alternative diet instead of a classical diet. For each 2 kg chicken fed with the alternative diet and with the same FCR, depending on the line, we would use 63.8-65.2 g less human-edible proteins and 153.5-158.0 g less human-edible energy than with the classical diet. This represents a decrease of 1.4% on protein and 1.8 to 3.5% on energy. This saving of resources by changing diet composition without any FCR improvement is roughly equivalent to the gain expected by a genetic improvement on the alternative diet of 0.10 of FCR for human-edible proteins (77.8-80.2 g) and by a decrease of 0.15 of FCR for human-edible energy (155.4-159.7 g).

Conclusion

Our study highlighted differences in the kinetics of feed intake, growth rate, and feed efficiency between the two broiler lines diverging for breast meat ultimate pH. The genetic determinism of body weight and feed efficiency varied to some extent between the two lines, which exhibited early metabolic differences. Having access to daily FCR data allowed for the identification of early relevant predictors, and opens the way to new strategies or methodologies for selecting feed efficiency.

Materials and methods

The present study was performed in agreement with the French National Regulation for human care and use of animals for research purposes and received the authorization number 2019071715406895_V2-21517. Animals were reared at the PEAT INRAE poultry experimental facility (2018, <https://doi.org/10.15454/1.5572326250887292E12>) registered by the French Ministry of Agriculture under license number C-37-175-1 for animal experimentation (INRAE, Centre Val de Loire, Nouzilly, France).

Table 4.2. Composition and age of distribution of diets.

Ingredient (%)	1-8 d	9-20 d	21-42 d
Corn	20.42	19.89	23.50
Wheat	30.10	30.10	30.10
Fava bean	-	12.00	13.00
Soybean meal	24.22	11.61	7.13
Rapeseed meal	5.00	5.00	8.00
Wheat DDGS	3.00	5.00	5.00
High fiber sunflower meal	8.12	7.73	5.19
Soybean oil	5.00	5.00	5.00
Corn gluten			
Calcium carbonate	0.655	0.142	0.00
Bicalcic phosphate	2.05	1.73	1.40
Salt	0.192	0.15	0.158
Vitamins and minerals	0.40	0.40	0.40
Sodium carbonate	0.196	0.262	0.250
DL-Methionine	0.234	0.285	0.234
HCL Lysine	0.176	0.264	0.250
Threonine	0.088	0.157	0.135
Valine	0.038	0.130	0.106
Tryptophane	-	-	0.005
Calculated composition			
AMEn, kcal/kg	2850	2900	2950
CP, g/kg	215	194	181
Lys, g/kg	11.2	10.9	10
Met + Cys, g/kg	8.4	8.17	7.5
Trp, g/kg	2.28	1.84	1.7

Birds and housing

In this study, we used animals from two experimental broiler lines divergently selected for a high (pHu+) or a low (pHu-) ultimate pH of the *Pectoralis major* muscle during fourteen generations. These lines came from a fast-growing grandparental female broiler line selected for both growth and reproduction traits. A complete description of the breeding scheme and performance of these lines can be found in Alnahhas et al. [14]. Two batches were reared in parallel for 42 days for the current study, the second batch starting one week later than the first one. The first and second batches respectively included 183 and 156 pHu- and 144 and 167 pHu+ of both sexes.

The temperature was set at 32°C at hatch and decreased progressively to reach 20-23°C from 29 d on. The light program was 24D:0N at d0, 23D:1N at 1 d and 18D:6N from 3 to 42 d. At hatch, the animals were identified with a wing band and an electronic Radio frequency identification device (RFID) chip, then weighed and placed in one pen on a floor covered with wooden chips. The RFID chip was placed at the base of the neck and secured with a plastic string passing under the skin.

The animals were fed *ad libitum* with a diet containing a high proportion of sunflower, rapeseed, and fava bean in order to reduce the soybean meal proportion in the diet. The detailed composition is shown in Table 4.2. A starter diet was given from hatch to 8 d (2850 kcal.kg⁻¹ DM; 21.5 % CP), a grower diet from 9 to 19 d (2900 kcal.kg⁻¹ DM; 20.0 % CP), and a finisher diet from 20 to 42 d (2950 kcal.kg⁻¹ DM; 18.5 % CP). Diet was formulated using the PORFAL software v.4.0.17 (ITP-INRA, Paris) in order to follow Hubbard broiler nutrition recommendations [22]. Potential interesting feedstuffs, such as Faba bean, sunflower meal, rapeseed and DDGS were included in the diet based on the results of a former project dedicated to the test of alternative feedstuffs for poultry diets [25].

Body weight and feed intake were individually and continuously recorded throughout the experiment thanks to electronic feed stations [11] and calculated following the procedure presented in Berger et al. [4].

Body weight, feed intake, weight gain, and feed conversion ratio

Body weight (BW), daily feed intake (DFI), average daily gain (ADG), and daily cumulative feed conversion ratio (DCFCR) were calculated as in Berger et al. [1]. Briefly, for each animal *i* at day *j*, average daily gain (ADG_{ij}) and daily cumulative feed conversion ratio (DCFCR_{ij}) were calculated as:

$$ADG_{ij} = \frac{BW_{i(j+2)} - BW_{i(j-2)}}{5}$$

$$DCFCR_{ij} = \frac{\sum_{k=3}^{k=j} DFI_{ik}}{BW_{ij} - BW_{i3}}$$

where DFI_{ij} and BW_{ij} are the daily feed intake and body weight of animal i for day j , respectively. $DCFCR_{42}$ stands for the cumulative feed conversion ratio over the whole rearing period.

Meat ultimate pH

At 42 d, the animals were weighed after 8 hours of feed withdrawal and transferred to the slaughterhouse of the PEAT INRAE poultry experimental facility (2018, <https://doi.org/10.15454/1.5572326250887292E12>).

After 24 hours of chilling, the right *Pectoralis major* and *Pectoralis minor* were cut and weighed. Breast meat yield (BMY) was calculated as:

$$BMY = 100 \times \frac{2 \times (Pectoralis\ major + Pectoralis\ minor)}{BW_{42}}$$

The ultimate pH of the *Pectoralis major* (pHu) was measured with a portable pH meter (model 506, Crison Instruments SA, Alella, Barcelona, Spain).

Phenotypic analyses

All phenotypes were first analyzed using the PROC GLM procedure of SAS 9.4 [26] with the following model:

$$y_{ijkl} = L_i + S_j + H_k + e_{ijkl}$$

with y_{ijkl} being the trait for animal l of line i , sex j and hatch k and e_{ijkl} the residual for animal l .

Genetic analyses

Heritability and genetic correlations between traits were estimated using VCE6.0 software [27, 28]. In addition to data collected during this experiment, data of pHu collected from previous generations of selection were included in the genetic analyses, leading to a variable number of data depending on the trait: 578 for BW, ADG, DFI, DCFCR and 9,541 for pHu and BMY. The pedigree file contained all animals from the beginning of the selection experiment, i.e. 23,319 animals.

Genetic analyses were conducted separately for each line. The animal model included the fixed effects of the sex ($N=2$) and batch ($N=31$) and the direct genetic effect of animal ($N=23,319$). When the maternal permanent environment effect ($N=1,961$) was not null, it was also included in the model of analysis.

Abbreviations

ADG: Average Daily Gain ($g \cdot d^{-1}$); BMY: Breast Meat Yield (%); CP: Crude Protein (%); CV: Coefficient of Variation (%); DCFCR: Daily Cumulative Feed Conversion Ratio ($g \cdot g^{-1}$);

DCFCR₄₂: Final Cumulative Feed Conversion Ratio at 42 days (g.g⁻¹); DFI: Daily Feed Intake (g.d⁻¹); FCR: Feed Conversion Ratio (g.g⁻¹); FE: Feed Efficiency; pHu: Ultimate pH of breast meat; pHu-: Broiler lines divergently selected for a low pHu; pHu+: Broiler lines divergently selected for a high pHu; RFID: Radio Frequency Identification Device

Authors' contributions

QB: data analysis; EG, QB, SG: feed station development; QB, JB, PG, MC: data acquisition. ELBD, SG, QB: project conception, interpretation of results, manuscript drafting; SG, ELBD: project supervision. All authors read and approved the manuscript.

Funding

This study was supported by Feed-a-Gene, a project that has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No. 633531.

Availability of data and materials

The datasets supporting the conclusions of this article are available in the Data INRAE repository, under the unique persistent identifier <https://doi.org/10.15454/QBNHAD>.

Ethics approval and consent to participate

Animals were reared at the PEAT INRAE poultry experimental facility (2018, <https://doi.org/10.15454/1.5572326250887292E12>) registered by the French Ministry of Agriculture under license number C-37-175-1 for animal experimentation (INRAE, Centre Val de Loire, and Nouzilly, France).

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests

References

1. Méda B, Dusart L, Lessire M, Hallouis JM, Bordeau T, Souchet C, et al. Replacing soybean meal by alternative protein sources: multicriteria assessment of a “Label Rouge” chicken production system. Proceedings of 11èmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours, France, 25-26/03/2015. 2015;1082–87.
2. Abasht B, Mignon-Grasteau S, Bottje W, Lake J. Genetics and genomics of feed utilization efficiency in poultry species. In: Aggrey SE, Zhou H, Tixier-Boichard M, Rhoads DD,

- editors. *Advances in poultry genetics and genomics*. Cambridge: Burleigh Dodds Series in Agricultural Science; 2020. p. 183–220. <https://doi:10.19103/AS.2020.0065.11>.
3. Lathuilière MJ, Miranda EJ, Bulle C, Couto EG, Johnson MS. Land occupation and transformation impacts of soybean production in Southern Amazonia, Brazil *J Clean Prod*. 2017;149:680–9. <https://doi:10.1016/J.JCLEPRO.2017.02.120>.
 4. Berger Q, Guettier E, Urvoix S, Bernard J, Ganier P, Chahnamian M, et al. The kinetics of growth, feed intake, and feed efficiency reveal a good capacity of adaptation of slow and rapid growing broilers to alternative diets. *Poult Sci*. 2021;100:101010. <https://doi:10.1016/j.psj.2021.01.032>.
 5. Foltyn M, Rada V, Lichovnikova M, Dračková E. Effect of corn DDGS on broilers performance and meat quality. *Acta Univ Agric Silvic Mendelianae Brun*. 2013; 61:59–64. <https://doi:10.11118/actaun201361010059>.
 6. Gopinger E, Xavier EG, Elias MC, Catalan AAS, Castro MLS, Nunes AP, et al. The effect of different dietary levels of canola meal on growth performance, nutrient digestibility, and gut morphology of broiler chickens. *Poult Sci*. 2014; 93:1130–6. <https://doi:10.3382/ps.2013-03426>.
 7. Aggrey SE, Karnuah AB, Sebastian B, Anthony NB. Genetic properties of feed efficiency parameters in meat-type chickens. *Genet Sel Evol*. 2010; 42:25. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-42-25>.
 8. Aggrey S, González-Cerón F, Rekaya R. Association of SNPs with components of residual feed intake parameters in a meat-type chicken population. *Proc 10th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Vancouver, BC, Canada, 17-22/08/2014*. 2014.
 9. Beaumont C, Guillaumin S, Geraert PA, Mignon-Grasteau S, Leclercq B. Genetic parameters of body weight of broiler chickens measured at 22°C or 32°C. *Br Poult Sci*. 1998;39:488–91. <https://doi:10.1080/00071669888647>.
 10. Zhang X, Tsuruta S, Andonov S, Lourenco DAL, Sapp RL, Wang C, et al. Relationships among mortality, performance, and disorder traits in broiler chickens: a genetic and genomic approach. *Poult Sci*. 2018;97:1511–8. <https://doi:10.3382/ps/pex431>.
 11. Guettier E, Urvoix S, Servant P, Mika A, Berger Q, Mignon-Grasteau S. Mise au point d'un automate de consommation alimentaire pour volailles nommé BIRD-e: Bird Individual Ration Dispenser-electronic. *Cahier des Techniques de l'INRA*. 2020;99:12 p.
 12. INRAE. Bird-e. Automate de consommation alimentaire pour volailles. 2020. <https://www.feed-a-gene.eu/media/bird-e-automate-de-consommation-alimentaire-pour-volailles>.
 13. Abasht B, Zhou N, Lee WR, Zhuo Z, Peripolli E. The metabolic characteristics of susceptibility to wooden breast disease in chickens with high feed efficiency. *Poult Sci*. 2019;98:3246-56. <https://doi:10.3382/ps/pez183>.

14. Alnahhas N, Berri C, Boulay M, Baéza E, Jégo Y, Baumard Y, et al. Selecting broiler chickens for ultimate pH of breast muscle: Analysis of divergent selection experiment and phenotypic consequences on meat quality, growth, and body composition traits. *J Anim Sci.* 2014;92:3816–24. [https://doi: 10.2527/jas.2014-7597](https://doi.org/10.2527/jas.2014-7597).
15. Le Bihan-Duval E, Debut M, Berri CM, Sellier N, Santé-Lhoutellier V, Jégo Y, et al. Chicken meat quality: genetic variability and relationship with growth and muscle characteristics. *BMC Genet.* 2008;9:53. [https://doi:10.1186/1471-2156-9-53](https://doi.org/10.1186/1471-2156-9-53).
16. Alnahhas N, Le Bihan-Duval E, Baéza E, Chabault M, Chartrin P, Bordeau T, et al. Impact of divergent selection for ultimate pH of Pectoralis major muscle on biochemical, histological, and sensorial attributes of broiler meat. *J Anim Sci.* 2015; 93:4524–31. [https://doi: 10.2527/jas.2015-9100](https://doi.org/10.2527/jas.2015-9100).
17. Métayer-Coustard S, Tesseraud S, Praud C, Royer D, Bordeau T, Coudert E, et al. Early growth and protein-energy metabolism in chicken lines divergently selected on ultimate pH. *Front Physiol.* 2021;12. [https://doi:10.3389/fphys.2021.643580](https://doi.org/10.3389/fphys.2021.643580).
18. Metayer-Coustard S, Franzoni A, Réhault-Godbert S, Collin A, Travel A, Raynaud E, et al. Variation in energy stores: impact on reproduction and egg characteristics in meat-type strains. *Proceedings of 13èmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours, France, 20-21/03/2019.* 2019; 206-9.
19. Tona K, Bamelis F, De Ketelaere B, Bruggeman V, Moraes VMB, Buyse J, et al. Effects of egg storage time on spread of hatch, chick quality, and chick juvenile growth. *Poult Sci.* 2003;82:736-41. [https://doi: 10.1093/ps/82.5.736](https://doi.org/10.1093/ps/82.5.736).
20. Beauclercq S, Nadal-Desbarats L, Hennequet-Antier C, Collin A, Tesseraud S, Bourin M, et al. Serum and muscle metabolomics for the prediction of ultimate pH, a key factor for chicken-meat quality. *J Proteome Res.* 2016;15:1168–78. [https://doi: 10.1021/acs.jproteome.5b01050](https://doi.org/10.1021/acs.jproteome.5b01050).
21. Beauclercq S, Hennequet-Antier C, Praud C, Godet E, Collin A, Tesseraud S, et al. Muscle transcriptome analysis reveals molecular pathways and biomarkers involved in extreme ultimate pH and meat defect occurrence in chicken. *Sci Rep.* 2017;7:6447. [https://doi:10.1038/s41598-017-06511-6](https://doi.org/10.1038/s41598-017-06511-6).
22. Hubbard. Poulet de chair : Guide et recommandations nutritionnelles. 2020. https://www.hubbardbreeders.com/media/hep_guide_broiler_fr.pdf.
23. Reed WL, Clark ME. Beyond maternal effects in birds: responses of the embryo to the environment. *Integr Comp Biol.* 2011;51:73–80. [https://doi:10.1093/icb/icr032](https://doi.org/10.1093/icb/icr032).
24. Laisse S, Baumont R, Dusart L, Gaudré D, Rouillé B, Benoit M, et al. L'efficacité nette de conversion des aliments par les animaux d'élevage : une nouvelle approche pour évaluer la contribution de l'élevage à l'alimentation humaine. *INRAE Prod Anim.* 2018;31:269–88. [https:// 10.20870/productions-animales.2018.31.3.2355](https://doi.org/10.20870/productions-animales.2018.31.3.2355).

25. Pampouille E, Dusart L, Bonnouvrier A, Danel J, Dauguet S, Désolé M, et al. VOCALIM - Mieux valoriser des matières premières métropolitaines dans l'alimentation des poulets de chair pour améliorer l'autonomie protéique française. *Innov Agron*. 2021;82:425–40.
26. SAS Institute Inc. SAS/STAT® 13.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. 2013.
27. Groeneveld LF, Lenstra JA, Eding H, Toro MA, Scherf B, Pilling D, et al. Genetic diversity in farm animals – a review. *Anim Genet*. 2010; 41:6–31. [https://doi: 10.1111/j.1365-2052.2010.02038.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2010.02038.x).
28. Neumaier A, Groeneveld E. Restricted maximum likelihood estimation of covariances in sparse linear models. *Genet Sel Evol*. 1998;30:3. [https://doi:10.1186/1297-9686-30-1-3](https://doi.org/10.1186/1297-9686-30-1-3).

Résumé des principaux résultats et conclusions

Différences entre lignées pHu+ et pHu- - Par rapport à la lignée pHu-, la lignée pHu+ présente une moindre efficacité alimentaire liée à une réduction de consommation alimentaire et de croissance en début d'élevage puis à une augmentation de consommation à croissance équivalente en fin d'élevage. Les performances des animaux pHu+ sont également plus variables que celles des pHu-.

Profils d'héritabilité – Les profils d'héritabilité des caractères varient fortement avec l'âge et la lignée. Cette étude génétique confirme l'importance des périodes de transitions alimentaires, déjà détectée dans l'étude phénotypique. Ainsi, l'héritabilité de l'efficacité alimentaire est plus élevée chez les pHu- sur toute la période d'élevage hormis les 5-6 jours autour de la seconde transition, pendant laquelle la différence d'héritabilité entre lignées disparaît.

Profils de corrélations génétiques - Les corrélations génétiques obtenues entre efficacité alimentaire finale, pHu et performances journalières, ont permis de confirmer l'existence d'une différence de métabolisme entre les deux lignées, avec une opposition des corrélations entre le pHu et les autres caractères entre les deux lignées. Dans les deux cas néanmoins, les profils de corrélations indiquent que l'élément déterminant de l'efficacité alimentaire est le niveau de consommation alimentaire.

Identification d'indicateurs précoces pour la sélection de l'efficacité alimentaire – Compte-tenu des valeurs d'héritabilité des variables quotidiennes et de leurs corrélations avec les performances finales, l'efficacité alimentaire précoce serait un critère de sélection pertinent de l'efficacité finale des animaux, mais l'âge auquel la mesurer différerait entre les deux lignées

CHAPITRE 5 : Evaluation de différentes stratégies de sélection de l'efficacité alimentaire du poulet de chair dans un contexte alimentaire alternatif au modèle mais-soja

Dans le chapitre précédent, nous avons montré qu'il était possible de trouver des indicateurs précoces de l'efficacité alimentaire qui pouvaient être utilisés pour la sélection de l'efficacité alimentaire finale. *L'objectif de cette dernière partie expérimentale était donc d'établir différentes stratégies de sélection de l'efficacité alimentaire et d'en comparer les impacts* en termes d'efficacité alimentaire, mais également de qualité des produits. Ces stratégies ont été élaborées à partir des données collectées lors de la seconde expérience sur les lignées pHu+ et pHu- (chapitre 4).

Les différentes stratégies qui ont été comparées sont les suivantes :

- **sélection directe sur l'efficacité alimentaire cumulée à 42 jours**, qui est l'objectif final
- **sélection indirecte sur le rendement en filet à 42 jours**. En effet, les animaux les plus efficaces sont en général ceux qui déposent le plus de protéines et ont un filet plus développé. Ce caractère est donc régulièrement utilisé comme critère de sélection indirect de l'efficacité alimentaire
- **sélection indirecte sur la valeur d'efficacité alimentaire cumulée à un âge particulier** :
 - soit à l'âge le plus précoce possible. D'après les résultats obtenus dans le chapitre précédent, nous avons retenu l'âge de 17 jours, qui correspond à un pic d'héritabilité dans la lignée pHu- tout en étant une valeur intéressante d'héritabilité dans la lignée pHu+
 - soit à un âge présentant la combinaison la plus intéressante possible d'héritabilité et de corrélation génétique avec l'efficacité finale (26 jours chez les pHu+ et 30 jours chez les pHu-).
- **sélection sur un profil d'évolution de l'efficacité alimentaire**. Cela permettrait d'être moins dépendant des évolutions d'un jour à l'autre des valeurs d'efficacité en prenant en compte l'ensemble de la croissance, tout en distinguant des animaux d'efficacité alimentaire finale équivalente, mais y parvenant par des chemins différents. La Figure 5.1

illustre par exemple, pour des animaux d'efficacité finale proche, les différences observables au long de leur vie quant à l'évolution de leur efficacité alimentaire.

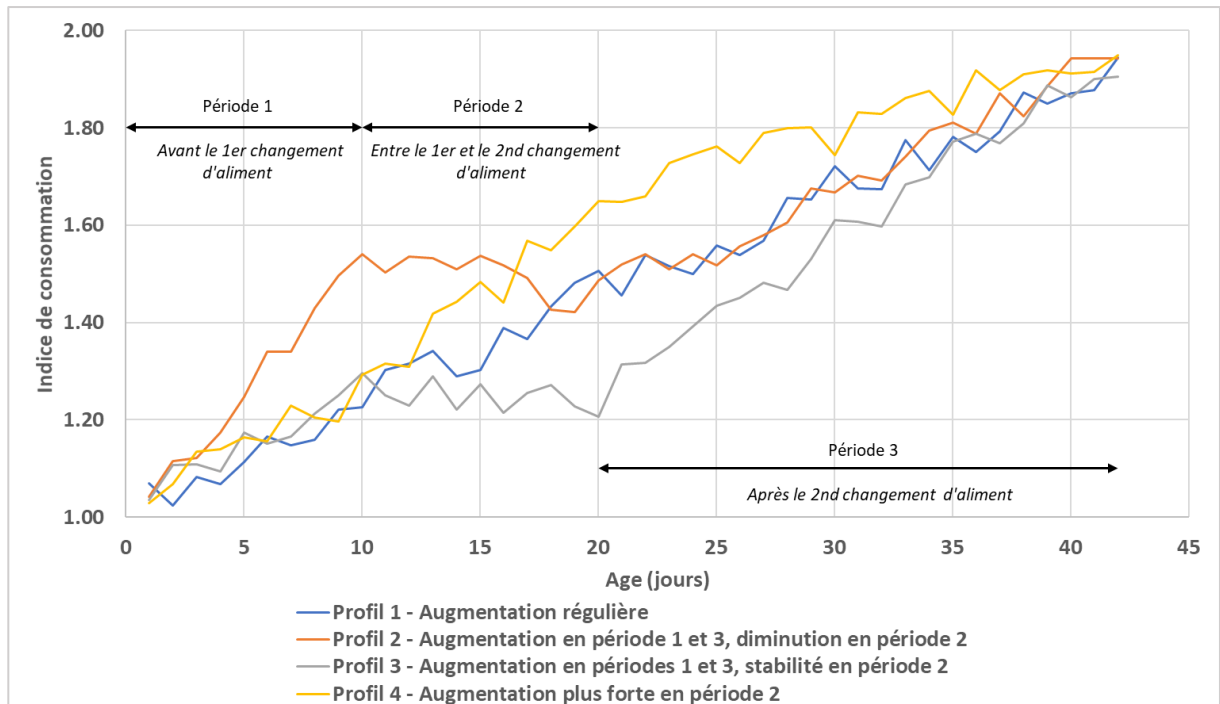


Figure 5.1. Profil d'efficacité de différents animaux présentant le même DCF42.

Nous avons donc comparé les réponses attendues à la sélection de ces différentes stratégies sur :

- l'indice de consommation cumulé à 42 jours, ainsi que sur la consommation alimentaire et le poids à l'abattage, qui en sont les composants, afin de comprendre quel paramètre du ratio allait le plus évoluer
- le rendement en filet et le pH ultime de la viande du filet, deux paramètres clés de rentabilité et de qualité pour la filière de production du poulet de chair.

Les résultats de cette troisième partie font l'objet d'une publication qui sera prochainement soumise dans Journal of Animal Science (Berger et al., 2022).

Comparison of different strategies of selection of feed efficiency in broilers

Quentin Berger¹, Elodie Guettier¹, Isabelle Bouvarel², Bertrand Méda¹, Jérémy Bernard³, Patrice Ganier³, Marine Chahnamian³, Elisabeth Le Bihan-Duval¹, Sandrine Mignon-Grasteau^{*,1}

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

² ITAVI, 37380 Nouzilly, France

³ INRAE, PEAT, 37380 Nouzilly, France

*Corresponding author: Sandrine Mignon-Grasteau

Email: sandrine.grasteau@inrae.fr

Address: INRAE, Université de Tours, BOA, 37380 Nouzilly, France

Phone Number: +33247427691

Abstract

The recent development of feed stations allows to re-examine the potential strategies of selection of feed efficiency in chickens in real conditions of production, i.e. on floor and in group whereas selection was previously done on data collected in individual cages. Moreover, by giving access to daily data and not only periodic data, these tools also give access to new traits such as daily feed efficiency and permit to model kinetics of feed efficiency throughout animals' life.

Using electronic feed stations, we thus collected during 42 days daily data of body weight, feed intake and cumulated feed conversion ratio (DCFCR) on 578 broilers from two lines divergently selected on high (pHu+) or low (pHu-) breast meat pH. At 6 weeks, we measured breast yield and breast meat pH. Based on their daily data of feed intake and body weight from hatch to 42 days, animals were categorized by hierarchical clustering into 5 clusters per line. Considering the estimated heritability of daily feed efficiency traits and their genetic correlations with feed conversion ratio at 42 days (DCFCR₄₂), we identified one early stage (17 d) and one late stage (26 d in pHu+, 30 d in pHu-) as potential criteria of selection of feed efficiency. We then compared expected responses of DCFCR₄₂ either to direct selection of DCFCR₄₂ or to indirect selection on body weight at 42 d, feed conversion ratio at early or late age and cluster number.

Clustering showed that the most efficient animals at 42 d were either those with a low feed conversion ratio at the first diet change or those with a decreasing FCR between the first and the second diet changes. The comparison of the strategies of improvement of DCFCR₄₂ showed that the best strategy differs between lines. In the pHu+ line, selection on DCFCR₄₂ or on cluster is equivalent and is associated mostly to a lower feed intake, but with a negative impact on breast yield. In the pHu- line, progress on profile is mostly obtained by a higher body weight at constant feed intake, while progress on DCFCR₄₂ is due to a higher body weight for a lower feed intake.

Keywords: selection, feed efficiency, kinetics, broiler, cluster

Introduction

Avian selection on feed efficiency requires data on individual feed intake and body weight. Therefore, as individual data collection of feed intake is mostly done on animals reared in cages, they are obtained in conditions that are far from real production conditions. As animals reared on floor have a higher physical activity (Ozhan et al., 2016), this is leading to a bias in feed efficiency measurement and selection based on cage data may thus not be adapted for the animals used in production. Moreover, in order to limit animal handling, animals are weighed

less than once per week, and feed conversion ratio can thus be calculated only over one or few periods of 1 week up to the whole rearing period (Berger et al., 2021).

The alternative is to use electronic feeders to collect individual feed intake on group- and floor-reared animals. These feeders are highly democratized in the pig industry (Lecce, 1969; Roller and Teague, 1970; Randall et al., 1976) but are still rare in poultry. Different prototypes have been developed, either on duck (Bley and Bessei, 2008; Basso et al., 2014) or on chicken (Yan et al., 2019; Li et al., 2021), giving access to individual feed intake, but some drawbacks are nevertheless present in existing feed stations. Firstly, most of designs rely on systems of isolation of animals. This is preventing double visits to the station but modifies feeding behavior of animals. Secondly, for most existing designs, the emphasis was placed on feed intake and feeding behavior but did not include body weight measurement (Howie et al., 2011; Yan et al., 2019). The feed efficiency data are then calculated on the periods between two manual weighing of animals. Finally, as feed intake per visit is very low at early ages, many designs provides data only after a few weeks, e.g. after 2 weeks in Howie et al. (2011) and after 8 weeks in Yan et al. (2019). Another design has been developed recently permitting to measure simultaneously body weight and feed intake of animals, without animal isolation (Guettier et al., 2020). Using this design, we recently showed that it was possible to obtain daily performances of feed intake, growth and feed efficiency and establish profiles of genetic parameters of these traits (Berger et al., 2021; Mignon-Grasteau et al., 2021). This is opening new possibilities in terms of strategies of selection of feed efficiency. Indeed, in addition to the classical selection on the final feed efficiency or growth, we can select on feed efficiency at an earlier age depending on its heritability and its genetic correlation with final feed efficiency. We can also take advantage of daily measures of feed efficiency to distinguish different profiles of animals and select them on these profiles.

The aim of this study was thus to compare different selection strategies to improve final feed efficiency. We used data from two broiler lines divergently selected on breast meat pH, from which we obtained daily performances of weight and feed intake throughout their life.

Materials and methods

The present study was performed in agreement with the French National Regulation for human care and use of animals for research purposes and received the authorization number 2019071715406895_V2-21517. Animals were reared at the PEAT INRAE poultry experimental facility (2018, <https://doi.org/10.15454/1.5572326250887292E12>) registered by the French Ministry of Agriculture under license number C-37-175-1 for animal experimentation (INRAE,

Centre Val de Loire, Nouzilly, France). Raw data can be found in the Data INRAE repository, under the unique persistent identifier <https://doi.org/10.15454/QBNHAD>.

Table 5.1. Composition and age of distribution of diets.

Ingredient (%)	1-8 d	9-20 d	21-42 d
Corn	20.42	19.89	23.50
Wheat	30.10	30.10	30.10
Fava bean	-	12.00	13.00
Soybean meal	24.22	11.61	7.13
Rapeseed meal	5.00	5.00	8.00
Wheat DDGS	3.00	5.00	5.00
High fiber sunflower meal	8.12	7.73	5.19
Soybean oil	5.00	5.00	5.00
Corn gluten			
Calcium carbonate	0.655	0.142	0.00
Bicalcic phosphate	2.05	1.73	1.40
Salt	0.192	0.15	0.158
Vitamins and minerals	0.40	0.40	0.40
Sodium carbonate	0.196	0.262	0.250
DL-Methionine	0.234	0.285	0.234
HCL Lysine	0.176	0.264	0.250
Threonine	0.088	0.157	0.135
Valine	0.038	0.130	0.106
Tryptophane	-	-	0.005
Calculated composition			
AMEn, kcal/kg	2850	2900	2950
CP, g/kg	215	194	181
Lys, g/kg	11.2	10.9	10
Met + Cys, g/kg	8.4	8.17	7.5
Trp, g/kg	2.28	1.84	1.7

Birds and housing

In this study, we used animals from two experimental broiler lines divergently selected for a high (pHu+) or a low (pHu-) ultimate pH of the *Pectoralis major* muscle during fourteen generations. These lines came from a fast-growing grandparental female broiler line selected for both growth and reproduction traits. A complete description of the breeding scheme and performance of these lines can be found in Alnahhas et al. (2014). Two batches were reared in parallel for 42 days for the current study, spaced a week apart. The first and second batches respectively included 183 and 156 pHu- and 144 and 167 pHu+ of both sexes.

The temperature was set at 32°C at hatch and decreased progressively to reach 20-23°C from 29 d on. The light program was 24D:0N at hatch, 23D:1N at 1 d and 18D:6N from 3 to 42 d. At hatch, the animals were identified with a wing band and an electronic Radio Frequency Identification Device (RFID) chip, then weighed and placed in one pen on a floor covered with wooden chips. The RFID chip was placed at the base of the neck and secured with a plastic string passing under the skin.

The animals were fed *ad libitum* with a diet containing a high proportion of sunflower, rapeseed, and fava bean in order to reduce the soybean meal proportion in the diet. The detailed composition is shown in Table 5.1. A starter diet was given from hatch to 8 d (2850 kcal.kg⁻¹ DM; 21.5 % CP), a grower diet from 9 to 19 d (2900 kcal.kg⁻¹ DM; 20.0 % CP), and a finisher diet from 20 to 42 d (2950 kcal.kg⁻¹ DM; 18.5 % CP).

Body weight and feed intake were individually and continuously recorded throughout the experiment thanks to electronic feed stations.

Body weight, feed intake, weight gain, and feed conversion ratio

Body weight (BW), daily feed intake (DFI), and daily cumulative feed conversion ratio (DCFCR) were calculated as in Berger et al. (2021). Briefly, for each animal *i* at day *j*, average daily gain (ADG_{*ij*}) and daily cumulative feed conversion ratio (DCFCR_{*ij*}) were calculated as:

$$ADG_{ij} = \frac{BW_{i(j+2)} - BW_{i(j-2)}}{5}$$

$$DCFCR_{ij} = \frac{\sum_{k=3}^{k=j} DFI_{ik}}{BW_{ij} - BW_{i3}}$$

where DFI_{*ij*} and BW_{*ij*} are the daily feed intake and body weight of animal *i* for day *j*, respectively. DCFCR₄₂ stands for the cumulative feed conversion ratio over the whole rearing period.

Meat ultimate pH

At 42 d, the animals were weighed after 8 hours of feed withdrawal and transferred to the slaughterhouse of the PEAT INRAE poultry experimental facility (2018, <https://doi.org/10.15454/1.5572326250887292E12>).

After 24 hours of chilling, the right *Pectoralis major* and *Pectoralis minor* were cut and weighed. Breast meat yield (BMY) was calculated as:

$$BMY = 100 \times \frac{2 \times (Pectoralis\ major + Pectoralis\ minor)}{BW_{42}}$$

The ultimate pH of the *Pectoralis major* (pHu) was measured with a portable pH meter (model 506, Crison Instruments SA, Alella, Barcelona, Spain).

Phenotypic clusters and slaughter performance

Using the PCA and HCPCP functions of the FactomineR package of R (Lê et al., 2008), 5 clusters have been identified for each line, in order to differentiate the evolution of the DCFCR throughout the life of the animals. The number of clusters retained was determined by combining the inertia gain and the number of animals in each cluster. For the creation of these clusters, data from day 5 to day 42 have been taken in account. As animals have been blood sampled on the 16th day, which altered their performances, data collected this day were not included in the PCA. Clusters then have been sorted from one (the most interesting) to five (the least interesting), based on the number of days during which DCFCR value was the lowest.

The effect of cluster on weight gain, body weight, feed efficiency, breast yield and breast meat pH at 42 days was evaluated with an analysis of variance including the fixed effects of hatch, sex and cluster (PROC GLM, SAS, 2013).

Genetic analyses

Genetic parameters were estimated using VCE6.0 software (Neumaier and Groeneveld, 1998, Groeneveld et al., 2010). In addition to data collected during this experiment, data of pHu, BMY and body weight at 42 d (BW_{42}) collected from previous generations of selection were included in the genetic analyses, leading to a variable number of data depending on the trait: 578 for the different clusters, DFI and $DCFCR_{42}$ and 9,541 for pHu, BMY and BW_{42} . The pedigree file contained all animals from the beginning of the selection experiment, i.e. 23,319 animals.

Genetic analyses were conducted separately for each line. In addition to the direct genetic effect of animal, the model included the fixed effects of the sex (N=2) and batch (N=31). When the maternal permanent environment effect (N=1,961) was not null, it was also included in the model of analysis.

Cluster selection and comparison to other scenarios

To find the best strategy of selection of final feed efficiency, we compared expected response to selection of this trait after selection of different selection criteria: final cumulative feed conversion ratio (DCFCR₄₂), final BW (BW₄₂), cluster 1 of DCFCR (CLUST_NUMB), one daily DCFCR before the second diet change (DCFCR₁₇) and one daily DCFCR after the second diet change (DCFCR₂₆ for pHu+ and DCFCR₃₀ for pHu-). In the latter two cases, the ages were chosen as compromises between the highest heritability and the highest genetic correlation with DCFCR₄₂ (Berger et al., 2021). In order to compare scenarios, the expected response to selection has been calculated using the following equation:

$$E(\Delta G_{DCFCR_{42}}) = \frac{i \times \sigma_{pDCFCR_{42}} \times r_g(ST, DCFCR_{42}) \times \sqrt{h^2_{ST} h^2_{DCFCR_{42}}}}{\Delta t}$$

where h^2_{ST} is the heritability of the selected trait, $h^2_{DCFCR_{42}}$ the heritability of DCFCR₄₂, i the intensity of selection, $r_g(ST, DCFCR_{42})$ the genetic correlation between the selected trait and DCFCR₄₂, $\sigma_{pDCFCR_{42}}$ the standard deviation of DCFCR₄₂ and Δt the interval of generation.

As i and $\sigma_{pDCFCR_{42}}$ and Δt were identical for all scenarios, they have been removed from our calculus for the comparison of scenarios. The comparison of scenarios thus depends only on heritability of the two traits and on the genetic correlation between them, we thus compared scenarios based on the simplified equation:

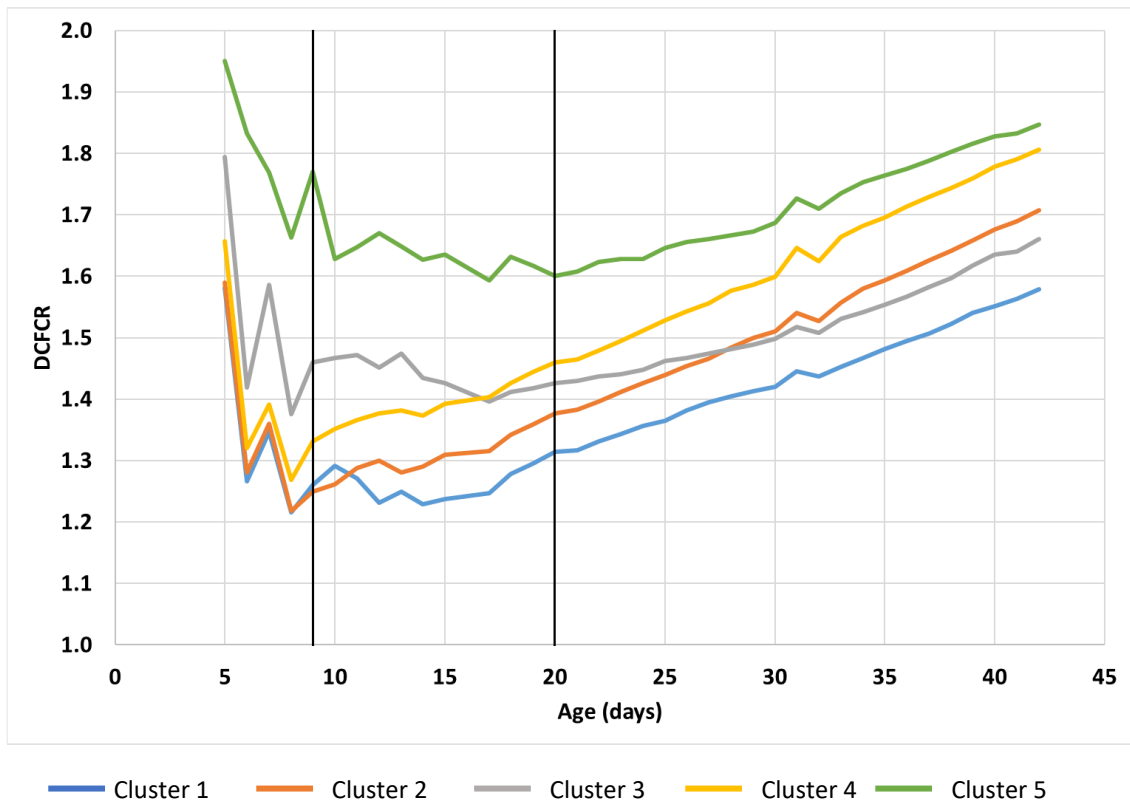
$$E(\Delta G_{DCFCR_{42}}) \propto r_g(ST, DCFCR_{42}) \times \sqrt{h^2_{ST} h^2_{DCFCR_{42}}}$$

Table 5.2. Feed efficiency clusters characteristics of the two pHu lines.

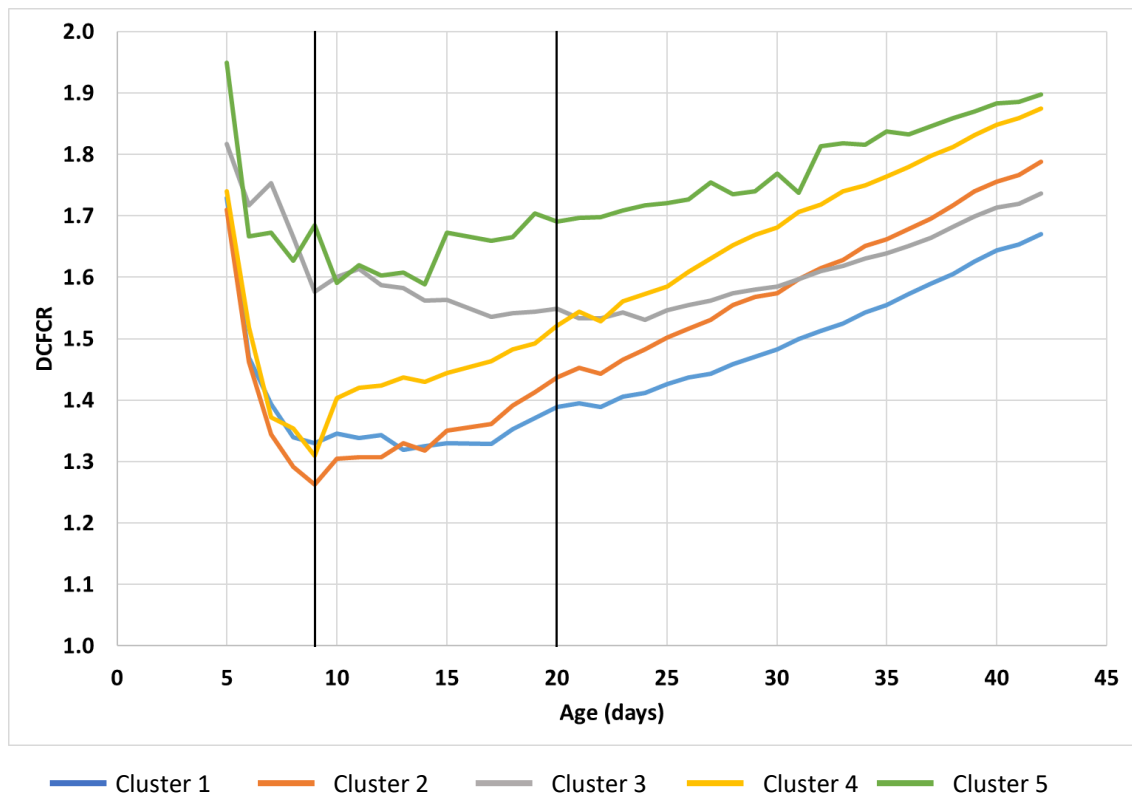
	Age (d)	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5
Line pHu+						
N		65	88	48	64	16
	1-8	13.8 ± 0.7	14.6 ± 0.6	13 ± 0.8	14.3 ± 0.7	13.2 ± 1.6
ADG (g.d⁻¹)	9-20	35.1 ± 0.4	35.9 ± 0.4	33.5 ± 0.5	34.7 ± 0.4	32.6 ± 0.9
	21-42	70.5 ± 0.3 ^a	68.5 ± 0.3 ^b	71.8 ± 0.4 ^a	66.6 ± 0.3 ^b	67.4 ± 0.6 ^b
	1-8	16.0 ± 1.9	16.6 ± 1.6	17.7 ± 2.1	17.6 ± 1.8	18.1 ± 3.7
DFI (g.d⁻¹)	9-20	58.6 ± 1.2	62.8 ± 1.1	61.3 ± 1.5	63.9 ± 1.2	63.5 ± 2.5
	21-42	155.1 ± 0.9 ^b	161.5 ± 0.7 ^a	161.3 ± 1.0 ^a	164.1 ± 0.9 ^a	166.7 ± 1.7 ^a
	1-8	1.56 ± 0.02 ^b	1.47 ± 0.01 ^c	1.85 ± 0.02 ^a	1.62 ± 0.02 ^b	1.88 ± 0.03 ^a
FCR	9-20	1.33 ± 0.01 ^e	1.34 ± 0.01 ^d	1.59 ± 0.01 ^b	1.44 ± 0.01 ^c	1.67 ± 0.02 ^a
	21-42	1.51 ± 0.01 ^d	1.60 ± 0.01 ^c	1.61 ± 0.01 ^c	1.70 ± 0.01 ^b	1.79 ± 0.01 ^a
Line pHu-						
N		48	121	54	68	29
	1-8	15.2 ± 0.8	15.8 ± 0.5	15.2 ± 0.8	15.5 ± 0.7	14.3 ± 1.2
ADG (g.d⁻¹)	9-20	37.5 ± 0.5 ^a	37.1 ± 0.3 ^a	36.1 ± 0.5 ^{ab}	36.1 ± 0.4 ^{ab}	33.5 ± 0.7 ^b
	21-42	73.4 ± 0.4 ^a	68.4 ± 0.2 ^c	70.7 ± 0.3 ^b	65.8 ± 0.3 ^d	65.8 ± 0.5 ^d
	1-8	16.3 ± 1.0	17.5 ± 0.6	19.0 ± 0.9	18.5 ± 0.8	19.6 ± 1.4
DFI (g.d⁻¹)	9-20	59.3 ± 1.4	62.0 ± 0.9	61.3 ± 1.3	63.7 ± 1.2	62.4 ± 2.1
	21-42	152.4 ± 2.1 ^b	154.6 ± 1.3 ^{ab}	152.3 ± 1.9 ^{ab}	156.6 ± 1.7 ^a	155.3 ± 3.1 ^a
	1-8	1.40 ± 0.02 ^d	1.44 ± 0.01 ^d	1.71 ± 0.01 ^b	1.51 ± 0.01 ^c	2.02 ± 0.02 ^a
FCR	9-20	1.25 ± 0.01 ^c	1.30 ± 0.01 ^d	1.44 ± 0.01 ^b	1.39 ± 0.01 ^c	1.66 ± 0.01 ^a
	21-42	1.44 ± 0.01 ^d	1.53 ± 0.01 ^c	1.52 ± 0.01 ^c	1.63 ± 0.01 ^b	1.72 ± 0.01 ^a

Figure 5.2. Clusters of DCFCR for the pHu- lines (a) and pHu+ line (b).

5.2.a.



5.2.b.



Results

Phenotypic evolution on considered traits as well as their profile of heritability and genetic correlation with final feed efficiency can be found in Berger et al. (submitted).

Profiles of DCFCR for the two lines

Kinetics of DCFCR in each cluster is presented in

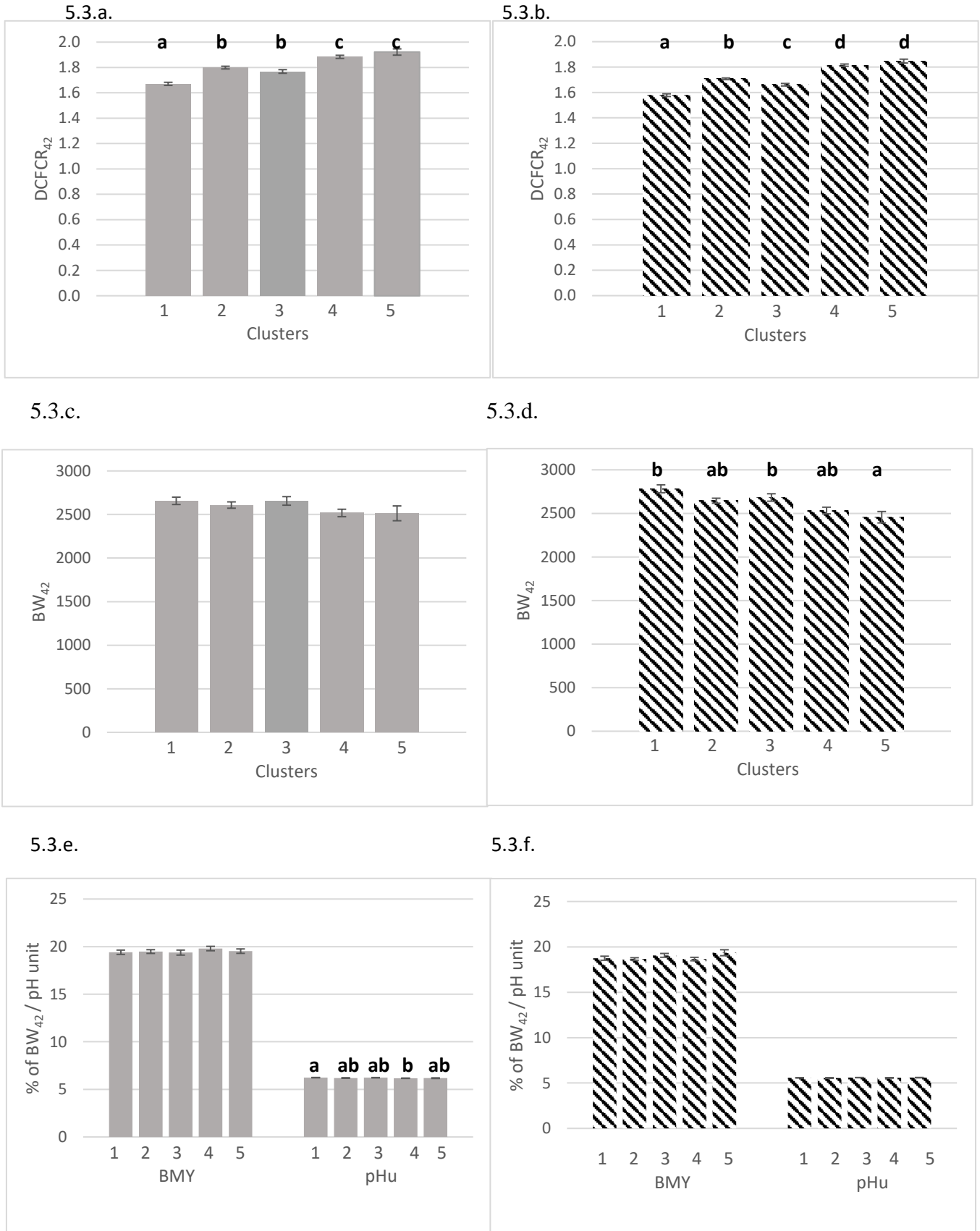
Figure 5.2. The distribution of chickens into clusters can be found in Table 5.2. For both lines, the most interesting cluster included 15.3% and 23.1% of the pHu- and pHu+ animals, respectively. This cluster 1 presented the lowest values of DCFCR throughout the life of the animals, except for pHu+ line, for which feed efficiency values were slightly better before 13 d in cluster 2. Final DCFCR value in cluster 1 was 1.57 in pHu- and 1.67 in pHu+, respectively. Feed efficiency in cluster 1 is thus better than in other clusters by 0.09 to 0.28 in pHu- line and by 0.07 to 0.22 in pHu+ line. Consistently with the fact that lines were issued from commercial broiler lines selected for growth and efficiency, the two clusters with the best feed efficiencies represented more than half of birds (54%), but there were still 29 to 31% of birds in the 2 clusters with the worst feed efficiency.

In all clusters, feed efficiency decreased between hatch and the first diet change and increased after the second diet change. The difference between clusters is thus due to the level of DCFCR at the first diet change and to the slope of evolution of DCFCR between the two diet changes. In cluster 1, DCFCR at the 1st diet change was low, and DCFCR remained stable between the diet changes. Clusters 2 and 4 had similar features, with a low value of DCFCR at the 1st diet change followed by an increasing DCFCR between the diet changes, with a higher starting value in cluster 4 than in cluster 2. Clusters 3 and 5 both started from high values of DCFCR at the 1st diet change, but DCFCR remained stable at a high value in cluster 5 between the two diet changes whereas it decreased in cluster 3. Due to this slope, cluster 3, which was the second worst before the 1st diet change, became better than cluster 4 between 17 and 22 d and better than cluster 2 between 27 and 32 d (

Figure 5.2). Final DCFCR was thus significantly better in cluster 1 than in all other clusters, and clusters 4 and 5 did not differ at this age (

Figure 5.2.a, b).

Figure 5.3. Slaughter performances of the different clusters studied DCFCR₄₂ (a, b) BW₄₂ (c, d) and BMY (e, f) in pHu+ line (full bars) and pHu- lines (dashed bars). Bars with different letters are significantly different ($P < 0.05$).



Differences between clusters at slaughter

BMY and pHu did not significantly differ between the different clusters in the line pHu– (Figure 5.3.f). For the line pHu+, BMY did not significantly differ between clusters but breast meat pHu of the cluster 1 was 0.06 higher than in cluster 4 (Figure 5.3.e).

Body weight at 42 d differed between clusters only for pHu-, animals being lighter in cluster 5 than in cluster 1 (2456 g vs 2782 g, cf.

Figure 5.2.d). In clusters 2 to 4, BW₄₂ had intermediate values, not significantly different from clusters 1 and 5.

Genetic Parameters

Heritability estimates. Genetic parameters of feed efficiency, profile of feed efficiency, breast meat yield and pHu are presented in Table 5.3. Heritability of feed efficiency traits were moderate to high, with much higher estimates in pHu- than in pHu+ line. At the opposite, DFI was more heritable in pHu+ than in pHu-. Finally, body weight, breast yield and pH and the cluster number got similar heritability estimates in both lines.

Genetic correlations between feed efficiency traits. The genetic correlations between DCF₄₂ and other feed efficiency traits was moderate to high (0.51 to 0.96), with much higher values in pHu- than in pHu+ line. In both cases, the cluster was highly correlated to DCF₄₂ (0.76 in pHu+, 0.89 in pHu-).

Genetic correlations between feed efficiency traits and BW₄₂. The genetic correlations between feed efficiency and BW₄₂ were nearly null in pHu+ but moderately negative in pHu- (Table 5.3). In pHu- line, BW₄₂ was surprisingly less correlated with final feed efficiency (-0.32) than with efficiency at earlier ages and with clusters of feed efficiency (-0.46 to -0.56).

Genetic correlations between feed efficiency traits and BMY. The correlations between feed efficiency traits and BMY were low in pHu- line (-0.07 to 0.17) and with final feed efficiency in pHu+ line (0.01). In the latter line, feed efficiency at 17 and 30 d and the cluster number showed moderate correlations with BMY (0.32 to 0.45).

Genetic correlations between feed efficiency traits and pHu. Correlations with pHu showed opposite signs between the two lines, which could be expected as the two lines have been selected divergently on pHu. In pHu+ line, the correlations with pHu were low to moderate for feed efficiency at 17 d, 30 d and cluster (-0.24 to -0.57) but high with DCF₄₂ (-0.95). At the opposite, correlations were moderately positive pHu (0.42 to 0.61).

Table 5.3. Heritability (diagonal) and genetic correlations (upper right triangle) estimates for the different traits of feed efficiency, body weight, breast yield and breast meat pH in pHu- lines.

	Line pHu-							
	DCFCR ₄₂	BW ₄₂	DFI	DCFCR ₁₇	DCFCR _M	Profile	BMY	pHu
DCFCR ₄₂	0.56 ± 0.09	-0.32 ± 0.1	0.34 ± 0.12	0.82 ± 0.06	0.96 ± 0.02	0.89 ± 0.04	-0.06 ± 0.12	0.61 ± 0.10
BW ₄₂		0.34 ± 0.03	0.77 ± 0.05	-0.46 ± 0.09	-0.50 ± 0.10	-0.56 ± 0.09	0.29 ± 0.06	0.04 ± 0.06
DFI			0.26 ± 0.04	0.06 ± 0.15	0.12 ± 0.15	0.01 ± 0.15	0.25 ± 0.08	0.46 ± 0.12
DCFCR ₁₇				0.49 ± 0.07	0.90 ± 0.10	0.93 ± 0.03	0.17 ± 0.08	0.56 ± 0.11
DCFCR _M ¹					0.64 ± 0.03	0.97 ± 0.10	-0.07 ± 0.11	0.56 ± 0.11
Profile						0.47 ± 0.09	-0.01 ± 0.10	0.42 ± 0.12
BMY							0.59 ± 0.04	0.23 ± 0.06
pHu								0.54 ± 0.04
	Line pHu+							
DCFCR ₄₂	0.31 ± 0.09	0.07 ± 0.09	0.50 ± 0.09	0.53 ± 0.10	0.51 ± 0.08	0.76 ± 0.06	0.01 ± 0.11	-0.95 ± 0.04
BW ₄₂		0.37 ± 0.03	0.90 ± 0.03	-0.04 ± 0.09	-0.02 ± 0.08	0.05 ± 0.09	0.31 ± 0.05	-0.07 ± 0.06
DFI			0.36 ± 0.04	0.17 ± 0.10	0.21 ± 0.10	0.39 ± 0.10	0.27 ± 0.07	-0.48 ± 0.07
DCFCR ₁₇				0.35 ± 0.04	0.89 ± 0.06	0.83 ± 0.06	0.40 ± 0.07	-0.30 ± 0.08
DCFCR _M ¹					0.43 ± 0.04	0.92 ± 0.03	0.45 ± 0.1	-0.24 ± 0.13
Profile						0.47 ± 0.05	0.32 ± 0.09	-0.57 ± 0.10
BMY							0.55 ± 0.03	0.20 ± 0.05
pHu								0.57 ± 0.03

¹ M: age at maximum heritability of feed efficiency (26 d in pHu+ line. 30 d in pHu- line)

Expected response to selection to the different scenarios

Expected response to selection on DCF_{CR42}, BW₄₂, FI, BMY and pHu are represented in the Figure 5.4.a for pHu+ line and Figure 5.4.b for pHu- line.

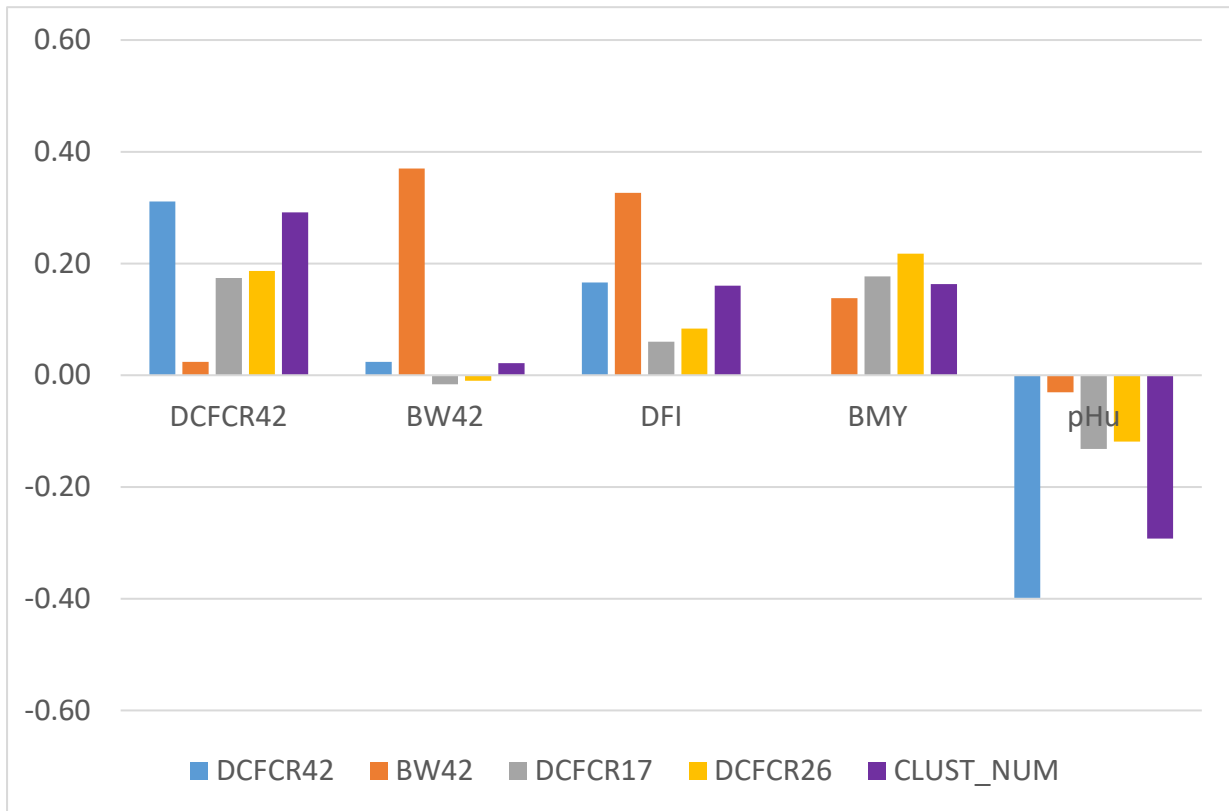
Impact on DCF_{CR42}. In both lines, selection on cluster number would give a good expected response to selection on DCF_{CR42}, equivalent to 82 to 94% of the response expected from direct selection. In the pHu- line, selection on feed efficiency at 30 days would even be more efficient than selection on DCF_{CR42}. Selection on feed efficiency at an early age would give lower but still high responses to selection on DCF_{CR42} (55 to 76% of the response to direct selection). Due to the very low correlations between BW₄₂ and DCF_{CR42}, selection on BW₄₂ would have nearly no impact on DCF_{CR42} (0.02 for pHu+, -0.14 for pHu-).

Impact on BW₄₂ and feed intake. The 4 strategies of selection of feed efficiency (DCF_{CR17}, DCF_{CR26} or DCF_{CR30}, DCF_{CR42} or cluster of feed efficiency) would have different impacts on body weight and feed intake in both lines. In pHu+ line, whatever the selection criterion, improving feed efficiency would be done mainly by a reduction of feed intake at a nearly constant final body weight. Reduction of feed intake would be twice as high by selecting DCF_{CR42} or clusters than by selecting DCF_{CR17} and DCF_{CR26}. At the opposite, in pHu- line, improvement of feed efficiency would mainly be obtained by reducing body weight, especially if the selection criterion is DCF_{CR30}. In this line, selecting on DCF_{CR42} is the only case in which a better feed efficiency would be obtained both by an increase of body weight and a decrease of feed intake.

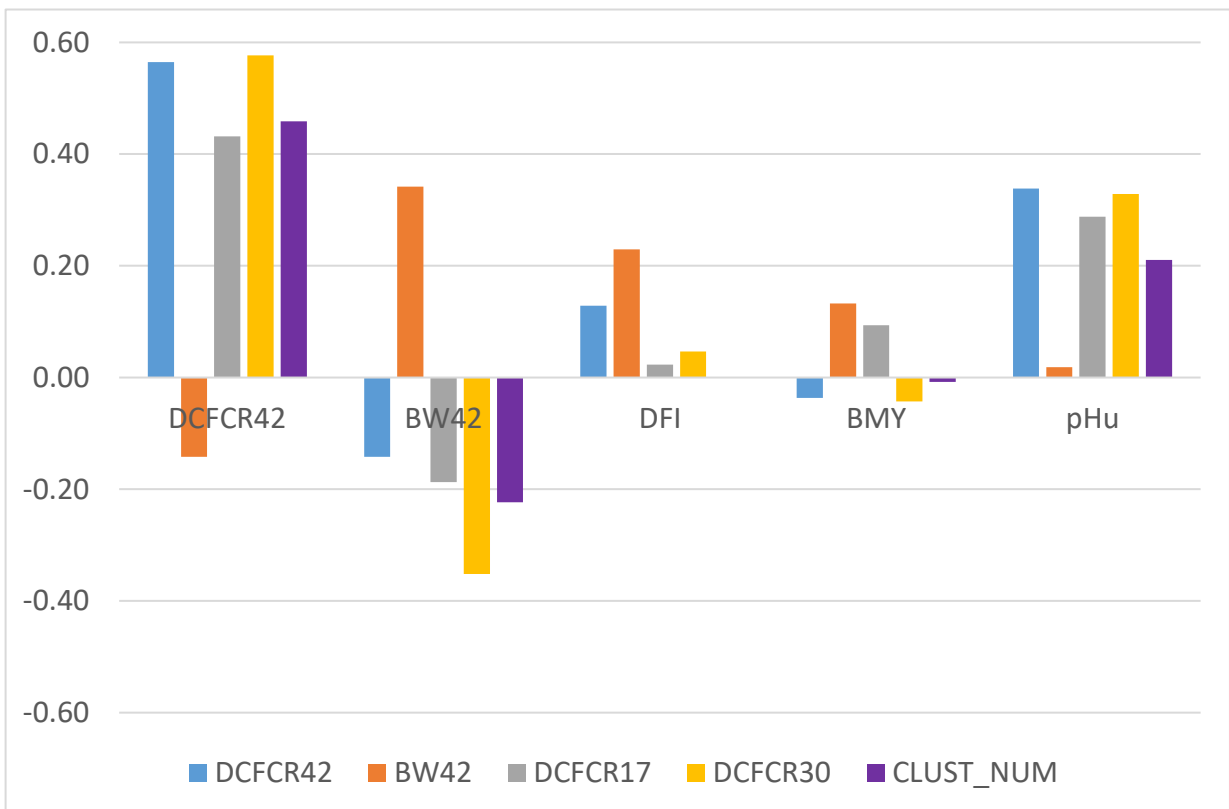
Impact on BMY and pHu. Whatever the selection criterion, selecting for more efficient birds would lead to more acid breast meat in pHu- line and less acid meat in pHu+ line, the highest impact being obtained with DCF_{CR42}. In pHu+ line, selection of a better DCF_{CR17}, DCF_{CR26} or on cluster would decrease breast yield but selection on DCF_{CR42} would not modify breast yield. In pHu- line, selection on DCF_{CR17} would not change breast yield, but selection at later ages (30 days, 42 days or on cluster) would lead to a highest breast yield.

Figure 5.4. Response to selection of DCF42, BW42, DFI, BMY and pHu in pHu+ (a) and pHu- (b) lines, depending of selected trait

5.4.a



5.4.b



Discussion

Our results showed a 4.2% global better feed efficiency in pHu-, consistently with the 7.1% difference already found by Alnahhas et al. (2017) in the same lines. This is consistent with the fact that the most efficient cluster 1 includes more animals in the pHu+ line (23%) than in the pHu- line (15%) whereas the less efficient cluster 5 includes more animals in the pHu+ than in the pHu- line (6% vs 9%). This is probably linked to the difference of metabolism between the two lines, as energy production is mostly done through more efficient metabolic pathways in the pHu- line (carbohydrate use) than in pHu+ line (lipid oxidation, muscle protein degradation, amino acid catabolism, Beauclercq et al., 2017).

Clusters of feed efficiency can be distinguished both on their ability to cope with the first diet change and on the level of feed efficiency at the first diet change, the latter reflecting the quality of starting period. The importance of starting period on the final performances has already been highlighted in chickens (Willemsen et al., 2008), including in the pHu+/pHu- lines (Métayer-Coustard et al., 2021). During this period, maintenance costs are proportionally low and most of the differences in feed efficiency are due to lower feed intake and/or higher growth rate (Marks, 1991). During this starting phase, the better DCFCR of cluster 1 was primarily due to a 4 to 17% lower feed intake than in all other clusters. Clusters 3 to 5 also showed a 3 to 7% reduced growth during the same period. During the grower phase, trends were less clear, but clusters 2 to 5 showed most often an equivalent or slower growth and equivalent or higher feed intake than cluster 1. During the finisher phase, a difference between the two lines was present, a better efficiency being clearly associated to lower feed intake in pHu+ line and to a higher growth in pHu- line.

Among the different scenarios of selection tested, and with a fixed intensity of selection of 1 (approximately 38% of the best individuals), selecting on BW₄₂ is the less interesting to improve global feed efficiency. Moreover, in both lines, the gain on body weight is obtained through an increased feed intake, as classically stated in the literature (Marks, 1991). Despite this drawback, when considering price paid per kg of live weight and feed cost (0.896€/kg and 306€/t, respectively, Méda et al., 2021), the economic gain of selection of body weight is still high and is even the best among the tested scenarios in pHu+ line (+6.1%). In the pHu+ line, the progress on body weight will also be associated to an increase of breast weight, which, in this line, is associated to a higher proportion of muscle defects such as white striping, due to lower reserves of glycogen in the muscle (Le Bihan-Duval et al., 2008; Alnahhas et al., 2017).

Due to contrasted evolutions of body weight and feed intake in both lines following selection of feed efficiency at 17, 26/30 d, 42 d or on clusters, the best strategy to improve feed efficiency is not the same in the two lines. Previous results in the literature also showed that, depending on genotype and age, the genetic correlations between feed efficiency, feed intake

and body weight vary largely and that variations of feed efficiency might thus be attributed mostly to body weight, weight gain or feed intake (Aggrey et al., 2010; Marchesi et al., 2021). In our case, in the pHu+ line, all these strategies would not change body weight but would decrease feed intake, the reduction being twice as high with a selection on DCF_{CR42} or clusters than with selection on DCF_{CR17} and DCF_{CR26}. Therefore, the economic gain obtained through selection of DCF_{CR42} or on clusters would be similar (+2.1%) and slightly better than with DCF_{CR17} or DCF_{CR26} (+1.5-1.6%). In the pHu- line at the opposite, the improvement of feed efficiency would mostly be due to an increase in body weight at constant feed intake. Selection on DCF_{CR30} and on clusters would thus more improve the economic gain (10.2% and 6.1%, respectively) than selection on DCF_{CR17} or DCF_{CR42} (5.4 and 5.7%, respectively).

Conclusion

Two scenarios of selection have been retained for pHu-, selection on kinetic of feed efficiency and on DCF_{CR30}. Selection on the kinetic of feed efficiency seems also interesting in the pHu+ lines, alongside DCF_{CR42}. Despite being interesting, they underline different ways of selecting animals and different impact on a global level.

References

- Aggrey, S. E., A. B. Karnuak, B. Sebastian, and N. B. Anthony. 2010. Genetic properties of feed efficiency parameters in meat-type chickens. *Genet Sel Evol* 42:25.
- Alnahhas, N., C. Berri, M. Boulay, E. Baéza, Y. Jégo, Y. Baumard, M. Chabault, and E. Le Bihan-Duval. 2014. Selecting broiler chickens for ultimate pH of breast muscle: Analysis of divergent selection experiment and phenotypic consequences on meat quality, growth, and body composition traits. *J Anim Sci* 92:3816–3824.
- Alnahhas, N., C. Berri, M. Chabault-Dhuit, M. Bourin, C. Arnould, and E. Le Bihan-Duval. 2017. Combined effect of divergent selection for breast muscle ultimate pH and dietary amino acids on chicken performance, physical activity and meat quality. *Animal* 11 :335-344.
- Basso, B., M. Lagüe, G. Guy, E. Ricard, and C. Marie-Etancelin. 2014. Detailed analysis of the individual feeding behavior of male and female mule ducks. *J Anim Sci* 92:1639-1646.
- Beauclercq, S., C. Hennequet-Antier, C. Praud, E. Godet, A. Collin, S. Tesseraud, S. Métayer-Coustard, M. Bourin, M. Moroldo, F. Martins, S. Lagarrigue, E. Le Bihan-Duval, and C.

- Berri. 2017. Muscle transcriptome analysis reveals molecular pathways and biomarkers involved in extreme ultimate pH and meat defect occurrence in chicken. *Sci Rep* 7:6447.
- Berger, Q., E. Guettier, S. Urvoix, J. Bernard, P. Ganier, M. Chahnamian, E. Le Bihan-Duval, and S. Mignon-Grasteau. 2021. The kinetics of growth, feed intake, and feed efficiency reveal a good capacity of adaptation of slow- and rapid-growing broilers to alternative diets. *Poult Sci* 100:101010.
- Berger, Q., E. Guettier, J. Bernard, P. Ganier, M. Chahnamian, E. Le Bihan-Duval, and S. Mignon-Grasteau. Profiles of genetic parameters of body weight and feed efficiency in two divergent broiler lines for meat ultimate pH. *BMC Genet* (submitted).
- Bley, T. A. G., and W. Bessei. 2008. Recording of individual feed intake and feeding behavior of pekin ducks kept in groups. *Poult Sci* 87:215-221.
- Groeneveld, E., M. Kovač, and N. Mielenz. 2010. VCE User's Guide and Reference Manual, version 6.0. Institute of Farm Animal Genetics, Neustadt, Germany.
- Guettier, E., S. Urvoix, P. Servant, A. Mika, Q. Berger, and S. Mignon-Grasteau. 2020. Mise au point d'un automate de consommation alimentaire pour volailles nommé BIRD-e: Bird Individual Ration Dispenser-electronic. *Cahier Tech INRA* 99 :1-12.
- Howie, J. A., S. Avendano, B. J. Tolkamp, and I. Kyriazakis. 2011. Genetic parameters of feeding behavior traits and their relationship with live performance traits in modern broiler lines. *Poult Sci* 90:1197-1205.
- Lê, S., J. Josse, and F. Husson. 2008. FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis. *J Stat Soft* 25:1-18.
- Le Bihan-Duval, E., M. Debut, C. M. Berri, N. Sellier, V. Santé-Lhoutellier, Y. Jégo, and C. Beaumont. 2008. Chicken meat quality: genetic variability and relationship with growth and muscle characteristics. *BMC Genet* 9:53.
- Lecce, J. G. 1969. Rearing colostrum-free pigs in an automatic feeding device. *J Anim Sci* 28:27-33.
- Li, G. M., Y. Zhao, J. L. Purswell, and C. Magee. 2021. Effects of feeder space on broiler feeding behaviors. *Poult Sci* 100:101016.

- Marchesi, J. A. P., R. K. Ono, M. E. Cantao, A. M. G. Guaratini, J. D. Oliveira, G. C. Monteiro Moreira, T. F. Godoy, L. L. Couthino, D. P. Munari, and M. C. Ledur. 2021. Exploring the genetic architecture of feed efficiency traits in chickens. *Sci Rep* 11:4622.
- Marks, H. L. 1991. Feed efficiency changes accompanying selection for body weight in chickens and quail. *W Poult Sci J* 47:197-212.
- Méda, B., F. Garcia-Launay, L. Dusart, P. Ponchant, S. Espagnol, A. Wilfart. 2021. Reducing environmental impacts of feed using multiobjective formulation: what benefits at the farm gate for pig and broiler production? *Animal* 15 :100024.
- Métayer-Coustard, S., S. Tesseraud, C. Praud, D. Royer, T. Bordeau, E. Coudert, E. Cailleau-Audouin, E. Godet, J. Delaveau, E. Le Bihan-Duval, and C. Berri. 2021. Early growth and protein-energy metabolism in chicken lines divergently selected on ultimate pH. *Front Physiol* 12:643580.
- Mignon-Grasteau, S., Q. Berger, E. Guettier, and E. Le Bihan-Duval. 2021. New advances based on our feed station and its use for feed efficiency phenotyping. 72th Eur Assoc Anim Prod, Davos, 30/08/2021-03/09/2021.
- Neumaier, A., and E. Groeneveld. 1998. Restricted maximum likelihood estimation of covariances in sparse linear models. *Genet Sel Evol* 30:3.
- Ozhan, N., U. G. Simsek, and M. Ozcelik. 2016. Comparison of floor and cage housing systems in terms of some welfare assessments in broiler. *Ank Univ Vet Fak Derg* 63:317–322.
- Randall, M., M. Herbert, and R. Hephherd. 1976. Automatic pneumatic conveying and weight-dispensing system for floor-feeding pellets to pigs. *J Agric Eng Res* 21:233–245.
- Roller, W., and H. Teague. 1970. Automatic paste feeding system for pigs. *Agric Eng* 51:304.
- SAS Institute Inc. 2013. SAS/STAT® 13.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Willemsen, H., N. Everaert, A. Witters, L. DE Smit, M. Debonne, F. Verschuere, P. Garain, D. Berckmans, E. Decuypere, and V. Bruggeman. 2008. Critical assessment of chick quality measurements as indicator of posthatch performance. *Poult Sci* 87:2358-2366.
- Yan, W., C. Sun, C. Wen, C. Ji, D. Zhang, and N. Yang. 2019. Relationships between feeding behaviors and performance traits in slow-growing yellow broilers. *Poult Sci* 98:548-555.

Résumé des principaux résultats et conclusion

Clusters d'efficacité alimentaire – L'observation des profils d'efficacité alimentaire montre que les deux points qui permettent de distinguer les animaux les uns des autres sont leur niveau d'efficacité alimentaire au 1^{er} changement d'aliment (qui traduit la qualité de leur démarrage) et la pente d'évolution de l'indice de consommation entre les 2 changements d'aliment. Les plus efficaces sont ceux avec un faible niveau d'indice de consommation au moment du 1^{er} changement d'aliment et ceux dont l'indice de consommation diminue entre les deux changements d'aliment.

Stratégie de sélection – Le déterminisme génétique des caractères étudiés différant fortement entre les deux lignées (cf. chapitre 4), il n'est pas surprenant de trouver que les meilleures stratégies de sélection pour améliorer l'indice de consommation ne sont pas les mêmes chez les pHu+ et les pHu-. Pour les pHu+, une sélection directe sur l'indice à 42 jours ou sur les profils d'efficacité donnerait des résultats comparables. Chez les pHu-, la meilleure stratégie de sélection indirecte serait d'utiliser un indicateur précoce de l'efficacité finale, l'indice cumulé à 30 jours. L'amélioration de l'indice passerait plutôt par une plus faible consommation alimentaire chez les pHu+ et par un poids plus élevé chez les pHu-. Cette amélioration de l'indice induira, chez les pHu-, une baisse du pHu et une augmentation du BMY, et chez les pHu+, une simple augmentation du pHu.

CHAPITRE 6 : Discussion générale

L'objectif de ce travail était de mettre en avant de nouveaux critères de sélection de l'efficacité alimentaire, en mettant à profit les nouvelles possibilités offertes par les outils de phénotypage à haut débit (identification de critères précoces, prise en compte de la cinétique d'évolution avec le temps). Il s'inscrivait dans le cadre de la promotion de la durabilité de la production avicole, ce qui impliquait de mener cette réflexion en intégrant les impacts en termes économiques, environnementaux et sociaux. L'efficacité alimentaire en aviculture a en effet un impact majeur sur ces 3 aspects (Figure 6.1).

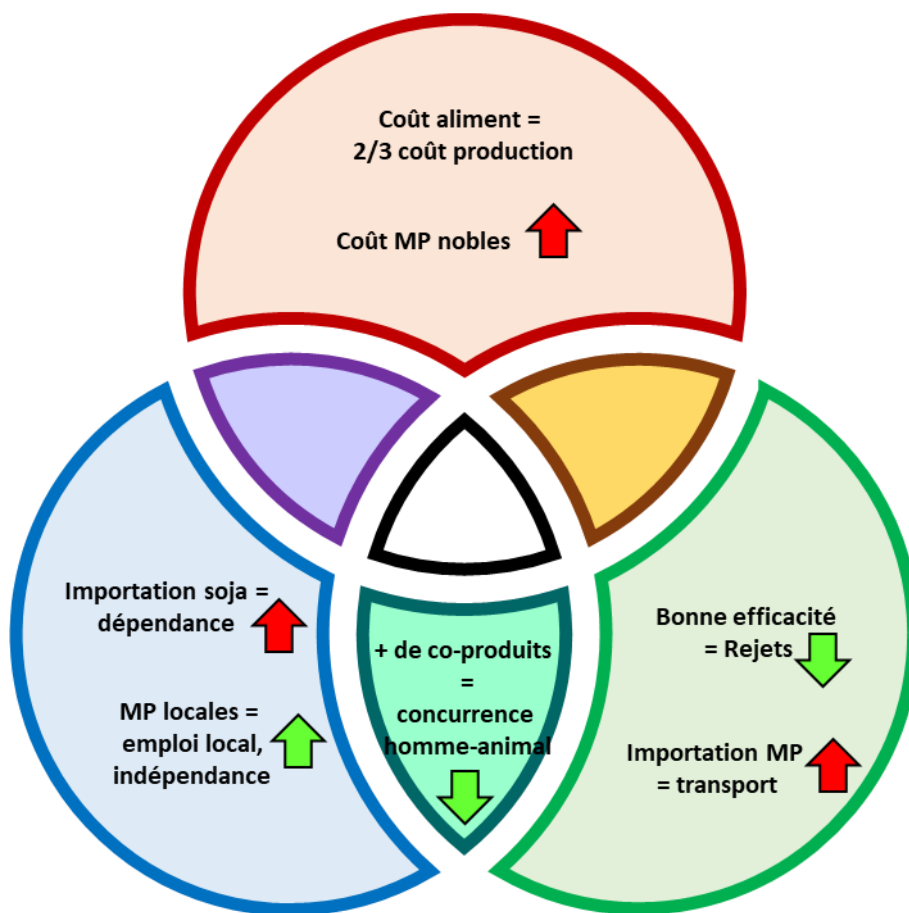


Figure 6.1. Liens entre efficacité alimentaire et durabilité.

La composition des régimes impacte à la fois les aspects sociaux et environnementaux de la durabilité au travers de la dépendance aux importations et de la concurrence entre alimentation animale et humaine, mais le recours aux matières premières alternatives peut affecter les performances. Nous avons donc placé la réflexion sur la recherche de nouveaux

critères de sélection de l'efficacité dans ce contexte de substitution des matières premières classiques par des matières premières alternatives.

L'accès aux données de consommation et d'efficacité alimentaire quotidiennes a tout d'abord permis de mettre en avant l'importance des transitions alimentaires.

1. Importance des périodes de transitions alimentaires

Les différentes études de la thèse ont permis de montrer que l'utilisation des mangeoires Bird-e permettait un suivi journalier fiable des performances au niveau du lot et de l'individu. Elles ont ainsi mis en évidence l'importance des transitions alimentaires, qui ressortent comme des moments critiques impactant la réponse des animaux. Lorsque les animaux ont été distingués selon leur profil d'évolution de l'indice de consommation avec l'âge, les deux facteurs de classification les plus importants étaient le niveau d'efficacité au moment de la première transition alimentaire, qui traduit la qualité au démarrage, et la pente d'évolution de l'indice de consommation entre les deux transitions, au moment où la vitesse de croissance est maximale.

L'observation des performances à l'approche des transitions pourrait donc être un outil d'aide au pilotage de l'élevage. En effet, une dégradation des performances (baisse du gain de poids, augmentation de la consommation alimentaire) dans les jours précédant les transitions alimentaires pourrait indiquer que l'aliment distribué ne répond plus complètement aux besoins des animaux. C'est par exemple ce que nous avons observé dans la 1^{ère} étude, au cours de laquelle les performances de croissance des poulets label ont été dégradées dans les 3 jours précédant la 2^{nde} transition alimentaire avant de retrouver leur niveau attendu après le changement d'aliment. Dans ce cas, l'observation des données quotidiennes pourrait amener à avancer l'âge de la transition par rapport aux préconisations habituelles et permettre ainsi aux animaux d'exprimer pleinement leur potentiel génétique.

A l'opposé, un ralentissement des performances après une transition alimentaire pourrait signaler une difficulté d'adaptation au nouvel aliment et suggérer de retarder la transition ou modifier la composition du régime distribué pour mieux l'adapter aux besoins des animaux. C'est par exemple ce que l'on observe après la 2^{nde} transition alimentaire dans l'étude des lignées pHu+ et pHu-. En effet, si la croissance des deux lignées est identique après cette transition, c'est au prix d'une consommation alimentaire plus élevée des pHu+, ce qui pourrait indiquer une inadéquation du régime aux besoins de cette lignée.

Au-delà des transitions alimentaires, on peut également signaler que le suivi quotidien des performances va permettre de connaître la réaction des animaux à diverses perturbations. C'est par exemple ce que nous avons pu observer à J17 dans l'étude sur les lignées pHu, où une baisse transitoire des performances a été observée suite à la prise de sang effectuée sur les animaux la veille.

2. Amélioration de l'efficacité alimentaire en contexte alternatif

L'amélioration de l'efficacité alimentaire en contexte alternatif peut permettre de progresser sur les différents aspects de la durabilité soit au travers de la composition du régime, même sans amélioration des performances, soit par la sélection pour améliorer l'indice de consommation, soit en cumulant les avantages des deux stratégies. La thèse permet d'apporter de nouvelles données pour évaluer les conséquences sur les différents piliers de la durabilité.

2.1. Régime alternatif

2.1.1. *Impact sur le coût de production*

Afin d'évaluer l'évolution du coût de production lié au passage d'un aliment à base de blé, maïs et de soja à un aliment contenant des matières premières alternatives et locales (féverole, tourteau de colza et de tournesol, drèches de blé), nous avons dans un premier temps calculé le prix des deux types d'aliment (Tableau 6.1) en utilisant les prix actuels des matières premières (Tableau 6.2). Ces éléments permettent de calculer le coût des aliments classiques (CD) et alternatifs (AD) utilisés dans la première étude pour les animaux labels et standards (Tableau 6.3). Les coûts des aliments CD et AD sont équivalents pour la période de démarrage du poulet label rouge et pour la période croissance du poulet standard. Dans les autres cas, l'aliment alternatif est 0.5 à 2.1% plus cher que l'aliment classique. Pour estimer le coût réel de l'utilisation de ces régimes alternatifs, nous avons pris en compte les consommations alimentaires mesurées dans la première étude, le poids final des animaux ainsi que les coûts de production hors aliment par kg de poids vif (0.420 € chez les animaux STD, 0.898 € chez les animaux label, chiffres ITAVI (2016)). Nous avons alors pu calculer le coût alimentaire par kg de poids vif pour les deux aliments et les deux types de production.

Tableau 6.1. Composition des différents régimes classiques (CD) et alternatifs (AD) pour des animaux à croissance rapide (STD) et à croissance lente (LR) utilisés au cours de nos études

Ingredient (%)	STD						LR					
	CD			AD			CD			AD		
	Démarrage	Croissance	Finition	Démarrage	Croissance	Finition	Démarrage	Croissance	Finition	Démarrage	Croissance	Finition
Maïs	30.650	35.970	39.800	20.420	18.890	23.500	29.620	42.920	46.620	18.250		16.950
Blé	30.100	30.100	30.100	30.100	30.100	30.100	38.550	30.100	30.100	40.100	57.950	45.100
Féverole					12.000	13.000				10.000	13.000	12.000
Tourteau de soja	32.860	28.520	25.150	24.220	11.610	7.130	28.080	23.160	19.840	18.540	6.730	5.200
Tourteau de colza				5.000	5.000	8.000				5.000	5.000	5.000
Drèches de blé				3.000	5.000	5.000				3.000	5.000	
Tourteau de tournesol				8.120	7.730	5.190					5.020	8.000
Huile de soja	2.210	1.900	1.990	5.000	5.000	5.000		0.360	0.570	1.420	3.820	3.800
Gluten												1.100
Calcium carbonate	0.710	0.169	0.002	0.655	0.142		0.600	0.274	0.300	0.590	0.390	0.350
Phosphate bicalcique	2.160	1.850	1.540	2.050	1.730	1.400	1.970	1.870	1.560	1.880	1.540	1.350
Sel	0.236	0.207	0.211	0.192	0.150	0.158	0.270	0.246	0.280	0.254	0.180	0.230
Prémix	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
Carbonate de sodium	0.135	0.173	0.175	0.196	0.262	0.250	0.100	0.129	0.081	0.114	0.227	0.160
DL-Methionine	0.269	0.275	0.231	0.234	0.285	0.234	0.204	0.211	0.114	0.207	0.230	0.114
HCL Lysine	0.176	0.264	0.250	0.287	0.414	0.392	0.154	0.243	0.125	0.183	0.373	0.214
Threonine	0.076	0.111	0.094	0.088	0.157	0.135	0.052	0.087	0.010	0.062	0.140	0.032
Valine	0.021	0.061	0.041	0.038	0.130	0.106						
Tryptophane						0.005						
Composition calculée												
AMEn, kcal/kg	2850	2900	2950	2850	2900	2950	2750	2850	2900	2750	2850	2890
CP, g/kg	215.0	200.4	187.1	215.0	194.3	181.3	200.0	179.8	165.0	200.0	179.0	164.9
Lys, g/kg	11.200	10.900	10.000	11.200	10.900	10.000	10.000	9.500	7.800	10.000	9.500	7.810
Met + Cys, g/kg	8.400	8.170	7.500	8.400	8.170	7.500	7.500	7.200	6.000	7.500	7.200	6.000
Trp, g/kg	2.280	2.060	1.890	2.280	1.840	1.700	2.100	1.790	1.620	1.990	1.730	1.490

Tableau 6.2. Prix des matières premières utilisées (€/t).

	Coût (€/t)		Coût (€/t)
Maïs	161.14	Phosphate bicalcique	470
Blé	163.17	Sel	72.42
Fèverole	240	Prémix	2700
Tourteau de Soja	380.79	Carbonate de calcium	552
Tourteau de Colza	270.75	DL-Méthionine	3050
DDGS	117.4	HCL Lysine	1416.67
Tourteau de tournesol	184.11	Thréonine	1600
Huile de soja	736.5	Valine	5000
Gluten	188.76	Tryptophane	15000
Carbonate de calcium	50		

Pour les animaux à croissance rapide, ce dernier s'élevait à 0.406 €/kg de poids vif et 0.389 €/kg de poids vif, respectivement avec le régime alternatif et le régime classique. Pour les animaux à croissance lente, ce coût alimentaire s'élevait à 0.615 € et 0.616 € par kg de poids vif pour les régimes alternatif et classique. **Il en ressort un coût de production identique quel que soit le régime, de 1.514 €/kg de poids vif, pour les animaux à croissance lente, et plus important de 2.9% pour les animaux à croissance rapide nourris avec le régime alternatif (0.826 €/kg de poids vif versus 0.809 €/kg de poids vif).**

Tableau 6.3. Coût des aliments classique (CD) et alternatif (AD) en €/tonne, en production label rouge (LR) ou standard (STD).

Phase	LR		STD	
	AD	CD	AD	CD
Démarrage	247.6	247.9	279.6	275.1
Croissance	242.3	241.0	267.2	267.3
Finition	233.2	228.3	259.0	257.0

2.1.2. Impact environnemental

Pour calculer l'impact environnemental du changement d'aliment, nous nous sommes appuyés sur les données d'impact environnemental de chaque matière première (Wilfart et al., 2016) et avons comparé les émissions de CO₂, le potentiel d'acidification, d'eutrophisation, l'énergie non renouvelable utilisée au cours du cycle de production, l'occupation des terres et finalement la demande en phosphore.

Comme pour le calcul de l'impact sur le coût de production, nous avons utilisé les données de croissance et de consommation des poulets standard et label de la première expérience (Tableau 6.4).

Tableau 6.4. Impact environnemental par kg de poids vif des régimes alternatif (AD) et classique (CD) utilisés pour les souches Label Rouge (LR) et standard (STD).

Critère ¹	Unité	LR ²		STD ²	
		AD	CD	AD	CD
CC	kg équivalent-CO2	1.72	1.99	1.15	1.27
AC	mol H+	0.026	0.031	0.016	0.018
EU	kg PO ₄ ³⁻	0.0100	0.0106	0.0062	0.0064
CEDNR	MJ	15.05	17.22	10.66	10.84
LO	m ² /an	3.37	3.91	2.36	2.06
PD	kg P	0.029	0.032	0.018	0.019

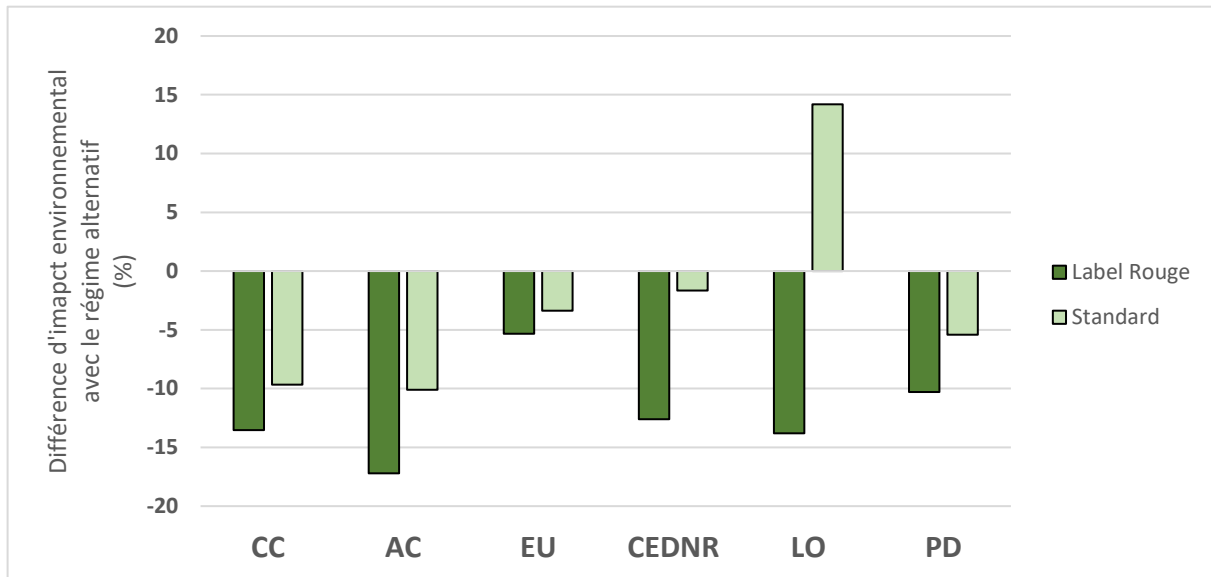
¹ : CC : changement climatique ; AC : Acidification ; EU : Eutrophisation ; CEDNR : Demande en énergie non renouvelable ; LO : Occupation des sols ; PD : Demande en phosphore

² : LR : Label rouge ; STD : Standard

L'utilisation d'un régime alternatif permet de réduire l'impact environnemental sur tous les postes (Tableau 6.4). Le gain est particulièrement important sur le changement climatique et l'acidification des sols. On note un impact plus important chez les labels que chez les standards pour la consommation d'énergie fossile et la dépendance en phosphore, alors que l'effet est plus fort chez les standards pour l'eutrophisation (Figure 6.2). Cet effet favorable de l'utilisation du régime alternatif vient principalement de sa plus faible teneur en soja et en maïs que le régime classique. En effet, ces cultures nécessitent de nombreux intrants, notamment en azote (qui génèrent l'acidification des sols) et phosphore (d'où l'impact sur les besoins en phosphore) et une forte mécanisation (qui génère de la consommation d'énergie fossile). Les matières premières alternatives sont de plus produites plus localement (diminuant ainsi fortement les émissions de carbone et l'énergie utilisée pour produire et apporter ces matières aux bassins de production).

Seule l'occupation des sols est plus importante dans le cadre de l'utilisation de régimes alternatifs, et ceci uniquement sur les souches à croissance rapide, les poulets élevés avec le régime alternatif ayant besoin de 0.30 m² de plus de surface de culture par an et par kg de poids vif. Cette augmentation est majoritairement due à la forte utilisation de féveroles dans les

régimes alternatifs en remplacement du soja. La féverolle occupe en effet 28% de surface en plus que le soja, car sa productivité est faible, du fait d'un ratio cosse-fleurs inférieur à 30%, alors que celui du soja peut aller jusque 61% (Alharbi et Adhikari, 2020 ; Kim et al., 2020).



CC: changement climatique ; AC: acidification; EU: eutrophisation; CEDNR: Besoin en énergies non renouvelables; LO: Occupation des sols ; PD: Besoin en phosphore

Figure 6.2. Différence d'impact environnemental du régime alternatif par rapport au régime classique (en % des impacts du régime classique) en production label rouge ou standard.

2.1.3. Impact sur le volet social du développement durable

Du point de vue social, l'utilisation de matières premières alternatives va permettre de réduire la dépendance de l'Europe vis-à-vis des différents pays producteurs de soja et de maïs tout en favorisant le travail local. De plus, dans le contexte de production actuel, des questionnements se posent sur les nombreux flux de marchandises qui sont nécessaires au bon fonctionnement de la production mondiale. En effet, du point de vue économique, l'absence de souveraineté alimentaire concernant l'alimentation des volailles rend la production européenne extrêmement sensible aux moindres perturbations que peuvent subir ces flux mondiaux. Par ailleurs, du point de vue sanitaire, ces flux importants sont des facteurs de transmission de virus, humain ou animal, entre pays avec des réglementations différentes (Hafez et Attia, 2020). Ces interrogations renforcent l'idée qu'une production plus locale serait favorable pour la durabilité de la production de volaille européenne. L'utilisation des matières premières alternatives va aussi diminuer la compétition homme-animal sur les sources d'énergie et de protéines. En effet,

les régimes alternatifs utilisés dans cette thèse contiennent 1.4% moins de protéines utilisables par l'homme et 1.8 à 3.5% moins d'énergie utilisable par l'homme par rapport aux régimes conventionnels. Ces régimes n'ayant pas ou peu d'impact sur les rendements en filet, leur utilisation ne devrait pas entraîner de surcoût pour les consommateurs.

2.2. Nouvelles stratégies de sélection

La seconde partie de la thèse a porté sur l'étude des possibilités d'amélioration génétique de l'efficacité à utiliser un régime alternatif (comparable à celui utilisé pour les poulets standards de la 1^{ère} étude) et sur la comparaison de plusieurs stratégies de sélection basées sur les paramètres génétiques estimés dans les lignées pHu.

2.2.1. *Impact sur le coût de production*

Avec leurs performances actuelles et le coût de l'aliment, le coût de production est actuellement de 0.872 €/ kg de poids vif pour les pHu+ et de 0.855 €/ kg de poids vif pour les pHu-. Afin d'évaluer l'impact sur le coût de production des différentes stratégies de sélection proposées au chapitre 5, nous avons pris en compte l'évolution suite à la sélection du poids vif à l'abattage (avec un prix de vente de 0.896 €/kg de poids vif, Méda et al., 2021), de la consommation alimentaire (en reprenant le calcul du coût de l'aliment du §2.1.1.) et ajouté le coût de productions hors-alimentation (0.420 €/kg de poids vif, ITAVI, 2016). Les différentes stratégies de sélection testées ont toutes démontré un impact économique favorable, que ce soit en diminuant les coûts alimentaires, en augmentant le poids vif ou en cumulant les deux (Tableau 6.4).

Tableau 6.4. Prix de vente, coûts de production et gain économique par animal et par kg de poids vif attendus par génération de sélection avec les différentes stratégies de sélection (i=1).

Lignée	Stratégie ¹	Prix de vente (€/animal)	Coût alimentaire (€/animal)	Coût hors-aliment (€/animal)	Gain économique (€/animal)	Gain économique (€/kg poids vif)
pHu-	Situation initiale	2.322	1.126	1.089	0.108	0.041
	BW42	2.416	1.156	1.133	0.128	0.047
	DCFCR17	2.374	1.123	1.113	0.138	0.052
	DCFCR30	2.419	1.120	1.134	0.165	0.061
	DCFCR42	2.362	1.109	1.107	0.145	0.055
	CLUST_NUM	2.384	1.126	1.117	0.140	0.053
pHu+	Situation initiale	2.304	1.163	1.080	0.061	0.024
	BW42	2.422	1.212	1.135	0.075	0.028
	DCFCR17	2.309	1.154	1.082	0.073	0.028
	DCFCR26	2.306	1.150	1.081	0.074	0.029
	DCFCR42	2.296	1.138	1.076	0.082	0.032
	CLUST_NUM	2.297	1.139	1.077	0.081	0.032

¹ BW42 : poids vif à 42 jours ; DCFCRX : indice de consommation cumulé à X jours ; CLUST_NUM : profil d'évolution de l'indice de consommation cumulé

Chez les pHu-, la meilleure stratégie est la sélection de l'indice cumulé à 30 jours, qui augmente le gain économique de 0.02 € par kg de poids vif. L'amélioration est principalement due au gain de poids et donc à l'augmentation du prix de vente des animaux qui est plus importante que l'augmentation du coût de production (coût alimentaire + coût hors aliment). En revanche, chez les pHu+, les gains les plus importants sont obtenus par la sélection sur le profil et l'indice à 42 jours (+0.008 €/kg poids vif, soit 34% d'augmentation) ou dans une moindre mesure à 26 jours (+0.005 €/kg de poids vif) et viennent principalement de la réduction du coût alimentaire, de 1.1 à 2.1% en fonction de la stratégie. Dans cette lignée, bien que n'étant pas la plus rentable économiquement, la sélection de l'indice à 26 jours permet de ne pas perdre sur le poids vif, contrairement à la sélection sur l'indice à 42 jours ou sur le profil. L'effort de sélection devra être plus important chez les pHu+ que chez les pHu- puisque non seulement les gains attendus de la sélection sont moins importants chez les pHu+ mais aussi que leur coût de production initial est plus élevé

2.2.2. Impact environnemental

Les différentes stratégies de sélection envisagées sont toutes intéressantes du point de vue environnemental (Tableau 6.5).

Tableau 6.5. Impact environnemental des différentes stratégies de sélection envisagées (par kg de poids vif)

Lignée	Stratégie ²	CC ¹	AC ¹	EU ¹	CEDNR ¹	LO ¹	PD ¹
		(kg CO2-eq)	(mol H+)	(kg PO43-)	(MJ)	(m ² .yr)	(kg P)
pHu-	Situation initiale	1.189	0.017	0.0068	11.075	2.472	0.0184
	DCFCR42	1.153	0.016	0.0066	10.738	2.398	0.0178
	Profil	1.159	0.016	0.0066	10.796	2.410	0.0179
	DCFCR 17	1.161	0.016	0.0066	10.814	2.414	0.0179
	DCFCR30	1.137	0.016	0.0065	10.588	2.364	0.0176
	BW42	1.172	0.017	0.0067	10.913	2.435	0.0181
pHu+	Situation initiale	1.240	0.018	0.0071	11.553	2.580	0.0191
	DCFCR42	1.218	0.017	0.0069	11.353	2.537	0.0188
	Profil	1.218	0.017	0.0069	11.357	2.537	0.0188
	DCFCR 17	1.228	0.017	0.0070	11.445	2.556	0.0190
	DCFCR26	1.226	0.017	0.0070	11.428	2.553	0.0189
	BW42	1.233	0.017	0.0070	11.479	2.562	0.0190

¹ CC: changement climatique ; AC: acidification; EU: eutrophisation; CEDNR: Besoin en énergies non renouvelables; LO: Occupation des sols ; PD: Besoin en phosphore

² DCFCRX : indice de consommation cumulé à X jours, Profil : profil d'évolution de l'indice de consommation au cours de la vie de l'animal, BW42 : poids vif à 42 jours

La stratégie qui apporte la plus forte amélioration par kg de poids vif est la sélection sur le DCFCR30 pour les animaux pHu-, avec une diminution de 4.4% des différents impacts environnementaux. Dans la lignée pHu+, sélectionner sur DCFCR42 ou sur les profils permet un progrès de 1.6% à 1.8% sur les différents impacts environnementaux (CC, AC, EU, CEDNR, LO et PD, Tableau 6.5). Dans les deux lignées, la sélection sur le BW42 ressort comme la moins intéressante, car elle est la seule à induire une augmentation de la consommation, et ne diminue donc l'impact de la production que de 0.5 à 1.4%.

2.2.3. Impact sur le volet social de la durabilité

Dans les deux lignées, seule la sélection sur le poids ne modifierait pas le pH ultime du filet. Dans tous les autres cas, le pH augmenterait dans la lignée pHu+, augmentant la fréquence de viandes de types DFD et diminuerait le pH dans la lignée pHu-, augmentant la fréquence de viandes de type acide (Alnahhas et al., 2014). Chez les pHu+, la sélection de l'indice à 42 jours est la seule stratégie qui ne dégraderait pas le rendement en filet. Chez les pHu-, la sélection sur le profil ne modifierait pas le rendement en filet et la sélection sur l'indice à 30 ou 42 jours l'améliorerait.

Conclusions sur l'amélioration de la durabilité de la production

L'utilisation du régime alternatif entraînera un léger surcoût chez les animaux standard mais sera neutre chez les labels. Une simulation de sélection chez des animaux standard a montré qu'améliorer l'indice de consommation pouvait entraîner un gain économique de 4.6 à 9.2% suivant le critère et la lignée sélectionnée.

Sur le plan environnemental, le changement de composition du régime atténue l'impact sur le changement climatique, l'eutrophisation, l'acidification, la consommation d'énergie non renouvelable et le besoin en phosphore de 2.4 à 15.2%. La sélection des différents critères d'indice de consommation a un impact environnemental positif plus ou moins important (0.5 à 4.4% selon la lignée, le critère de sélection et l'indicateur d'impact environnemental considérés). La sélection sur le poids augmente la consommation alimentaire et améliore donc faiblement les performances environnementales.

La modification des régimes alimentaires et la sélection de l'indice auront un impact social plutôt positif car ils vont globalement réduire la dépendance aux importations de soja. Il faut cependant rester vigilant sur les impacts qu'ils pourraient avoir sur les fonctions productives (c'est à dire la quantité et la qualité du filet), dont les variations semblent dépendantes de la souche.

La sélection d'animaux sur leur efficacité alimentaire avec un régime alternatif permettra de cumuler les progrès dus à la nutrition et à la sélection. Selon le type génétique considéré, la sélection de l'indice de consommation à un âge précoce (26/30 jours) et sur le profil d'évolution de l'indice de consommation permet un bon compromis entre les performances économiques, environnementales et sociales.

3. Perspectives d'utilisation de l'automate

3.1. Sélection des animaux labels

L'accès des animaux à l'extérieur voire à un parcours est de plus en plus plébiscité par les consommateurs (voir projet ACCEPT, Delanoue et al. (2018)). L'élevage en plein-air est ainsi un critère important dans la qualité d'image des poulets Label Rouge, mais il également un facteur de variation de leur efficacité alimentaire (N'Dri et al., 2007). Il existe notamment une variabilité dans l'utilisation des parcours, avec selon les études de 15 à 50% d'animaux explorateurs (Jones et al. 2006; Zeltner and Hirt, 2008, Castellini et al., 2016). L'analyse génétique de l'efficacité alimentaire des souches alternatives implique donc de pouvoir mesurer le caractère au sein de bâtiments d'élevage donnant accès au parcours, ce qui semble possible selon des essais récents à INRAE avec l'automate BIRD-e. Ceci permettra de préciser le lien phénotypique et génétique entre activité sur le parcours et efficacité alimentaire, et plus largement d'évaluer la résilience des animaux face aux variations environnementales.

Concernant les souches de type Label, dont l'âge d'abattage est réglementé et ne doit pas être inférieur à 81 jours pour le poulet (Beaumont et al., 2004), la sélection sur l'efficacité alimentaire doit autant que possible se faire à vitesse de croissance équivalente. Pour ces génétiques, il serait intéressant d'évaluer les possibilités de sélection de la consommation résiduelle plutôt que l'indice de consommation, et les effets sur les autres caractères (croissance, qualité de la viande, comportement...). Dans tous les cas, une modélisation plus fine de la cinétique d'efficacité sera un atout pour adopter les meilleures stratégies de sélection de ces souches à croissance lente, dont l'indice de consommation est aujourd'hui 1,8 plus important que celui du poulet standard (Malher et al., 2018).

3.2. Une sélection encore plus précise des animaux

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés uniquement aux cinétiques journalières des différentes performances. Toutefois, les données étant acquises pour chaque repas, il est possible d'étudier la cinétique alimentaire au sein d'une journée. D'après des premiers résultats, cela permet de séparer des animaux de consommation totale identique mais avec des profils d'alimentation différents. A titre d'exemple, la Figure 6.3 montre les consommations observées pour 4 animaux pHu+ âgés de 17 jours (2 à forte consommation, 2 à faible consommation) qui présentent un nombre de visites, des durées de visites et des quantités ingérées par repas très différents (Tableau 6.6).

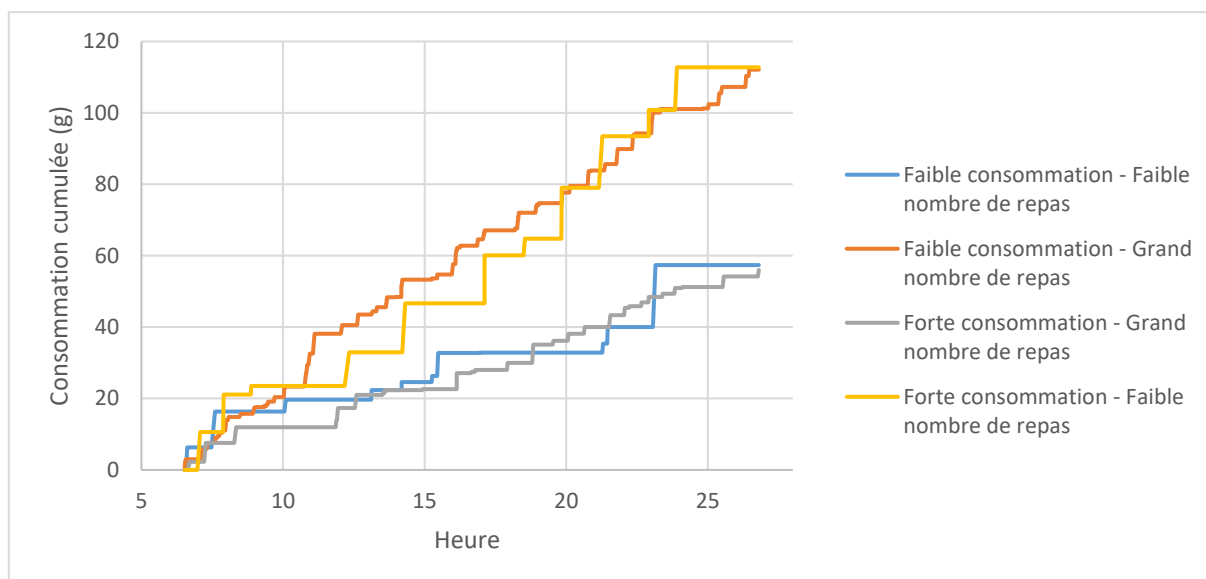


Figure 6.3. Cinétique d'ingestion d'animaux à forte et à faible consommation journalière.

Les relations entre le comportement alimentaire et efficacité sont encore peu connues, mais Howie et al. (2011) ont montré pour différents génotypes de poulets que la durée et la taille du repas influencent l'efficacité alimentaire (corrélation de 0.20 à 0.25 selon le génotype). L'accès en continu aux données de performances et de consommation devrait permettre de raffiner la connaissance des liens entre comportement et efficacité alimentaires. Ceci sera d'autant plus important dans le contexte actuel de réchauffement climatique (Hertig et Jacobeit, 2014) et pour les productions avec un accès à l'extérieur. En effet, la température impacte les poulets de manière non négligeable, ces derniers présentant une consommation et une efficacité plus faibles lorsque la température est élevée (Syafwan et al., 2012 ; Liu et al., 2016). Dans ce contexte, la sélection devra également intégrer la répartition des repas dans la journée et évaluer les liens avec l'efficacité mais aussi la physiologie et les capacités d'adaptation de l'animal.

Tableau 6.6. Comportement alimentaire et performances d'animaux pHu+ de 17 jours étudiés pour la journée du 20/12/2019.

	Faible consommation		Forte consommation	
	Peu de repas	Nombreux repas	Peu de repas	Nombreux repas
Consommation (g.jour ⁻¹)	57.4	54.0	112.8	112.1
Nombre repas	11	97	12	31
Consommation par repas (g)	5.2	1.2	9.3	1.8
Durée Repas (s)	180	54	324	86
Vitesse Ingestion (g/s)	0.029	0.021	0.029	0.021
Poids vif	525.79	410	676.32	527.9
Indice de consommation	1.29	1.26	1.38	2.83

Conclusion générale

Les modes d'élevage et de sélection des volailles de chair doivent évoluer afin de mieux intégrer les enjeux du développement durable. Que ce soit sur le volet environnemental avec l'impact de régimes riches en maïs et soja, sur le volet social avec la meilleure prise en compte du bien-être de l'animal en élevage, ou sur la question de la compétition entre nutrition humaine et animale, de nombreux progrès peuvent encore être apportés par la filière avicole. Les questions touchant à l'impact environnemental de la production peuvent être adressées en modifiant le régime de ces animaux pour réduire la part des matières premières pouvant nourrir l'homme et augmenter celle de matières alternatives peu valorisables en nutrition humaine. Cette modification impacte aussi bien l'amont de la filière, avec la nécessité de mettre en place une sélection adaptée au nouveau contexte alimentaire et d'organiser les filières d'approvisionnement en matières premières alternatives, que l'aval dans la mesure où les performances économiques et la qualité des produits doivent autant que possible être maintenues suite à cette transition.

Au niveau européen, la transition alimentaire nécessitera des adaptations à différents échelons de la filière (modifications des lignes de productions d'aliment, réflexions sur les rotations de cultures, répercussion sur le prix d'achat des volailles...), dont les répercussions sur les coûts de production pourraient être plus importantes que celles envisagées dans nos travaux (Pampouille et al., 2021). L'introduction d'une taxe sur l'impact carbone ou de subventions pour favoriser la production de matières alternatives locales pourrait cependant à terme rendre la production européenne plus attractive. Du point de vue écologique, les impacts environnementaux positifs trouvés au cours de cette thèse pourraient évoluer avec l'augmentation de la demande en matières premières alternatives, du fait de la pression sur les rendements des nouvelles cultures et l'accroissement potentiel des intrants. L'utilisation de l'automate de consommation BIRD-e a permis l'obtention de cinétiques d'efficacité alimentaire et l'étude de leur déterminisme génétique au sein de deux lignées d'animaux à croissance rapide nourries avec un régime alternatif. Les résultats ont montré des différences entre lignées dont le profil métabolique varie, confirmant que l'efficacité alimentaire est un caractère complexe. La simulation de différentes stratégies confirme cependant que des gains significatifs peuvent être attendus d'une sélection sur l'efficacité alimentaire appliquée en conditions nutritionnelles alternatives, tout en mettant en évidence des réponses variées sur les fonctions productives (quantité et qualité de la viande). Des approches originales, basées sur l'identification de profils d'évolution de l'indice de consommation ou sur la recherche d'indicateurs précoces, ont été testées et peuvent amener à revisiter les pratiques de sélection de l'efficacité alimentaire. Ces nouvelles approches, aujourd'hui permises par les technologies

de phénotypage à haut-débit de l'efficacité alimentaire, seront particulièrement intéressantes à développer sur des souches alternatives à croissance plus lente, dont l'impact environnemental est plus élevé. Le cadre de ces futures recherches devra inclure les liens avec des indicateurs de la résilience et du bien-être des animaux et la qualité de leurs produits, afin de contribuer à une efficacité alimentaire durable.

Références

- ABASHT, B., MIGNON-GRASTEAU, S., BOTTJE, W. & LAKE, J., 2020. Genetics and genomics of feed utilization efficiency in poultry species. Dans S.E. AGGREY, H. ZHOU, M. TIXIER-BOICHARD & D.D. RHOADS (eds.), *Advances in poultry genetics and genomics*. S.l.: Burleigh Dodds Science Publishing, pp. 183-220.
- ABASHT, B., ZHOU, N., LEE, W.R., ZHUO, Z. & PERIPOLLI, E., 2019. The metabolic characteristics of susceptibility to wooden breast disease in chickens with high feed efficiency. *Poultry Science*, Vol. 98, n° 8, pp. 3246-3256.
- ABUDABOS, A.M., AL-ATIYAT, R.M., STANLEY, D., ALJASSIM, R. & ALBATSHAN, H.A., 2017. The effect of corn distiller's dried grains with solubles (DDGS) fortified with enzyme on growth performance of broiler. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 24, n° 26, pp. 21412-21421.
- AGGREY, S., GONZÁLEZ-CERÓN, F. & REKAYA, R., 2014. Association of SNPs with components of residual feed intake parameters in a meat-type chicken population. *10th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production*. Vancouver, BC, Canada.
- AGGREY, S.E., KARNUAH, A.B., SEBASTIAN, B. & ANTHONY, N.B., 2010. Genetic properties of feed efficiency parameters in meat-type chickens. *Genetics Selection Evolution*, Vol. 42, pp. 25-30.
- AHMADI, M., 2016. The Effect of Different Levels of Rapeseed Meal with and without Enzyme on the Performance and the Serum Level of Triiodothyronine (T3), Thyroxine (T4) and Thyroid Stimulating Hormone (TSH) in Broiler Chickens. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, Vol. 6, n° 1, pp. 203-209.
- AKPOBOME, G.O. & FANGUY, R.C., 1992. Evaluation of cage floor systems for production of commercial broilers. *Poultry Science*, Vol. 71, n° 2, pp. 274-280.
- ALAGAWANY, M., ATTIA, A.I., IBRAHIM, Z.A., MAHMOUD, R.A. & EL-SAYED, S.A., 2017. The effectiveness of dietary sunflower meal and exogenous enzyme on growth, digestive enzymes, carcass traits, and blood chemistry of broilers. *Environmental Science and Pollution Research International*, Vol. 24, n° 13, pp. 12319-12327.
- ALHARBI, N. & ADHIKARI, K., 2020. Factors of yield determination in faba bean (*Vicia faba*). *Crop and Pasture Science*, Vol. 71, pp. 305-321.
- ALIZADEH, M., RODRIGUEZ-LECOMPTE, J.C., ROGIEWICZ, A., PATTERSON, R. & SLOMINSKI, B.A., 2016. Effect of yeast-derived products and distillers dried grains with

solubles (DDGS) on growth performance, gut morphology, and gene expression of pattern recognition receptors and cytokines in broiler chickens. *Poultry Science*, Vol. 95, n° 3, pp. 507-517.

ALJUOBORI, A., ZULKIFLI, I., SOLEIMANI, A.F., ABDULLAH, N. & LIANG, J.B., 2016. Growth performance, carcass characteristics and blood parameters of broiler chickens fed on canola meal under high environmental temperature. *European Poultry Science*, Vol. 80, pp. 127-138.

ALNAHHAS, N., BERRI, C., BOULAY, M., BAÉZA, E., JÉGO, Y., BAUMARD, Y., CHABAULT, M. & LE BIHAN-DUVAL, E., 2014. Selecting broiler chickens for ultimate pH of breast muscle: Analysis of divergent selection experiment and phenotypic consequences on meat quality, growth, and body composition traits. *Journal of Animal Science*, Vol. 92, n° 9, pp. 3816-3824.

ALNAHHAS, N., BERRI, C., CHABAULT, M., CHARTRIN, P., BOULAY, M., BOURIN, M.C. & LE BIHAN-DUVAL, E., 2016. Genetic parameters of white striping in relation to body weight, carcass composition, and meat quality traits in two broiler lines divergently selected for the ultimate pH of the pectoralis major muscle. *Bmc Genetics*, Vol. 17, pp. 61-69

ALNAHHAS, N., BERRI, C., CHABAULT-DHUIT, M., BOURIN, M., ARNOULD, C. & LE BIHAN-DUVAL, E., 2017. Combined effect of divergent selection for breast muscle ultimate pH and dietary amino acids on chicken performance, physical activity and meat quality. *Animal*, Vol. 11, n° 2, pp. 335-344.

ALNAHHAS, N., LE BIHAN-DUVAL, E., BAÉZA, E., CHABAULT, M., CHARTRIN, P., BORDEAU, T., CAILLEAU-AUDOUIN, E., METEAU, K. & BERRI, C., 2015. Impact of divergent selection for ultimate pH of pectoralis major muscle on biochemical, histological, and sensorial attributes of broiler meat. *Journal of Animal Science*, Vol. 93, n° 9, pp. 4524-4531.

AMERAH, A.M., VAN DE BELT, K. & VAN DER KLIS, J.D., 2015. Effect of different levels of rapeseed meal and sunflower meal and enzyme combination on the performance, digesta viscosity and carcass traits of broiler chickens fed wheat-based diets. *Animal*, Vol. 9, n° 7, pp. 1131-1137.

AN, B.K., JUNG, J.H., OH, S.T., KANG, C.W., LEE, K.W. & LEE, S.R., 2016. Effects of Diets with Graded Levels of Canola Meal on the Growth Performance, Meat Qualities, Relative Organ Weights, and Blood Characteristics of Broiler Chickens. *Brazilian Journal of Poultry Science*, Vol. 18, n° 2, pp. 351-356.

- ASHAYERIZADEH, A., DASTAR, B., SHARGH, M.S., MAHOONAK, A.R.S. & ZEREHDARAN, S., 2018. Effects of feeding fermented rapeseed meal on growth performance, gastrointestinal microflora population, blood metabolites, meat quality, and lipid metabolism in broiler chickens. *Livestock Science*, Vol. 216, pp. 183-190.
- ASHAYERIZADEH, A., DASTAR, B., SHARGH, M.S., MAHOONAK, A.S. & ZEREHDARAN, S., 2017. Fermented rapeseed meal is effective in controlling Salmonella enterica serovar Typhimurium infection and improving growth performance in broiler chicks. *Veterinary Microbiology*, Vol. 201, pp. 93-102
- BAÉZA, E., ARNOULD, C., JLALI, M., CHARTRIN, P., GIGAUD, V., MERCERAND, F., DURAND, C., METEAU, K., LE BIHAN-DUVAL, E. & BERRI, C., 2012. Influence of increasing slaughter age of chickens on meat quality, welfare, and technical and economic results. *Journal of Animal Science*, Vol. 90, n° 6, pp. 2003-2013.
- BAILEY W. M. & H. S. SIEGEL, 1984. Instrumentation for Measuring Continuous Activity, Feed and Water Consumption, and Growth Rate of Chickens. *Transactions of the ASAE*, Vol. 27, n° 1, pp. 201-204.
- BAREKATAIN, R., SWICK, R.A., TOGHYANI, M. & DE KONING, C.T., 2017. Interactions of full-fat canola seed, oat hulls as an insoluble fiber source and pellet temperature for nutrient utilization and growth performance of broiler chickens. *Poultry Science*, Vol. 96, n° 7, pp. 2233-2242.
- BASSO, B., LAGÜE, M., GUY, G., RICARD, E. & MARIE-ETANCELIN, C., 2014. Detailed analysis of the individual feeding behavior of male and female mule ducks,. *Journal of Animal Science*, Vol. 92, n° 4, pp. 1639-1646.
- BEAUCLERCQ, S., HENNEQUET-ANTIER, C., PRAUD, C., GODET, E., COLLIN, A., TESSERAUD, S., METAYER-COUSTARD, S., BOURIN, M., MOROLDO, M., MARTINS, F., LAGARRIGUE, S., LE BIHAN-DUVAL, E. & BERRI, C., 2017. Muscle transcriptome analysis reveals molecular pathways and biomarkers involved in extreme ultimate pH and meat defect occurrence in chicken. *Scientific Reports*, Vol. 7, pp. 6447-6460.
- BEAUCLERCQ, S., NADAL-DESBARATS, L., HENNEQUET-ANTIER, C., COLLIN, A., TESSERAUD, S., BOURIN, M., LE BIHAN-DUVAL, E. & BERRI, C., 2016. Serum and Muscle Metabolomics for the Prediction of Ultimate pH, a Key Factor for Chicken-Meat Quality. *Journal of Proteome Research*, Vol. 15, n° 4, pp. 1168-1178.
- BEAUMONT, C., BIHAN-DUVAL, E. LE, JUIN, H. et MAGDELAINE, P., 2004. Productivité et qualité du poulet de chair. *INRAE Productions Animales*. Vol. 17, n° 4, pp. 265-273

- 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*, Vol. 39, n° 4, pp. 488-491.
- BELLAMY, D. & LEONARD, R.A., 1965. Effect of cortisol on the growth of chicks. *General and Comparative Endocrinology*, Vol. 5, n° 4, pp. 402-410.
- BERGER, Q., GUETTIER, E., BERNARD, J., GANIER, P., CHAHNAMIAN, M., LE BIHAN-DUVAL, E. & MIGNON-GRASTEAU, S., Non Paru. Profiles of genetic parameters of body weight and feed efficiency in two divergent broiler lines for meat ultimate pH.
- BERGER, Q., GUETTIER, E., URVOIX, S., BERNARD, J., GANIER, P., CHAHNAMIAN, M., LE BIHAN-DUVAL, E. & MIGNON-GRASTEAU, S., 2021. The kinetics of growth, feed intake, and feed efficiency reveal a good capacity of adaptation of slow and rapid growing broilers to alternative diets. *Poultry Science*, Vol. 100, n° 4, pp. 101010-101023.
- BERWANGER, E., NUNES, R., DE OLIVEIRA-BRUXEL, T., BAYERLE, D. & GIUSTI BRUNO, L.D., 2017. Performance and carcass yield of broilers fed increasing levels of sunflower cake. *Revista Caatinga*, Vol. 30, pp. 201-212
- BIESEK, J., KUZNIACKA, J., BANASZAK, M., KACZMAREK, S., ADAMSKI, M., RUTKOWSKI, A., ZMUDZINSKA, A., PERZ, K. & HEJDYSZ, M., 2020. Growth Performance and Carcass Quality in Broiler Chickens Fed on Legume Seeds and Rapeseed Meal. *Animals*, Vol. 10, n° 5, pp. 846-862.
- BLEY, T.A.G. & BESSEI, W., 2008. Recording of Individual Feed Intake and Feeding Behavior of Pekin Ducks Kept in Groups. *Poultry Science*, Vol. 87, n° 2, pp. 215-221.
- BOGGIA, A., PAOLOTTI, L. & CASTELLINI, C., 2010. Environmental impact evaluation of conventional, organic and organic-plus poultry production systems using life cycle assessment. *World's Poultry Science Journal*, Vol. 66, n° 1, pp. 95-114.
- BOKKERS, E. a. M. & KOENE, P., 2003. Eating behaviour, and preprandial and postprandial correlations in male broiler and layer chickens. *British Poultry Science*, Vol. 44, n° 4, pp. 538-544.
- BOSCO, A.D., RUGGERI, S., MATTIOLI, S., MUGNAI, C., SIRRI, F. & CASTELLINI, C., 2013. Effect of Faba Bean (*Vicia Faba* Var. Minor) Inclusion in Starter and Growing Diet on Performance, Carcass and Meat Characteristics of Organic Slow-Growing Chickens. *Italian Journal of Animal Science*, Vol. 12, n° 4, pp. 76-83.

- BÖTTGER, C. & SÜDEKUM, K.-H., 2017. European distillers dried grains with solubles (DDGS): Chemical composition and in vitro evaluation of feeding value for ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, Vol. 224, pp. 66-77.
- BUENAVISTA, R.M.E., SILIVERU, K. & ZHENG, Y., 2021. Utilization of Distiller's dried grains with solubles: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, Vol. 5, pp. 100195-100203.
- CAPPER, J.L., 2012. Is the Grass Always Greener? Comparing the Environmental Impact of Conventional, Natural and Grass-Fed Beef Production Systems. *Animals*, Vol. 2, n° 2, pp. 127-143.
- CASTELLINI, C, MUGNAI, C., MOSCATI, L., MATTIOLI, S., GUARINO AMATO, M., CARTONI MANCINELLI, A. et DAL BOSCO, A., 2016. Adaptation to organic rearing system of eight different chicken genotypes: behaviour, welfare and performance. *Italian Journal of Animal Science*. Vol. 15, n° 1, pp. 37-46.
- CHEGENI, A., TORKI, M. & KAMYAB, A., 2011. Effects of beta-mannanase-based enzyme in corn-soy and corn-soy-canola diets on broiler performance. *Journal of Applied Animal Research*, Vol. 39, n° 3, pp. 261-268.
- CHENUT, R., 2017. Prévision et estimation du coût de production et du revenu en élevage avicole. *ITAVI*, pp. 1-4.
- CHENUT, R., COULETEL, G. & MAGDELAINE, P., 2013. Structure et organisation des filières volailles de chair en Europe : analyse comparée des filières allemande, britannique, espagnole et néerlandaise et belge. *ITAVI*, pp. 1-102.
- CHEVA-ISARAKUL, B. & TANGTAWEEWIPAT, S., 1991. Effect of Different Levels of Sunflower Seed in Broiler Rations. *Poultry Science*, Vol. 70, n° 11, pp. 2284-2294.
- CHIANG, G., LU, W.Q., PIAO, X.S., HU, J.K., GONG, L.M. & THACKER, P.A., 2010. Effects of Feeding Solid-state Fermented Rapeseed Meal on Performance, Nutrient Digestibility, Intestinal Ecology and Intestinal Morphology of Broiler Chickens. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, Vol. 23, n° 2, pp. 263-271.
- CHOBANOVA, S., 2019. Effects of compound poultry feed with different content of high-protein sunflower meal on growth performance of broiler chickens. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, Vol. 25, n° Suppl. 3, pp. 91-94.
- CIURESCU, G., VASILACHI, A., GRIGORE, D. & GROSU, H., 2019. Growth performance, carcass traits, and blood biochemistry of broiler chicks fed with low-fibre sunflower meal and phytase. *South African Journal of Animal Science*, Vol. 49, n° 4, pp. 735-745.

- COZANNET, I.P., LESSIRE, M., METAYER, J.P., GADY, C., PRIMOT, Y., GERAERT, P.A., TUTOUR, L.L., SKIBA, F. & NOBLET, J., 2010. Valeur nutritive des drêches de blé et de maïs pour les volailles. *INRAE Productions Animales*, Vol. 23, n° 5, pp. 405-414.
- CRISAN, M., 2020. Pratiques culturelles en grandes cultures. *Agriste Chiffres et Données*, Vol. 2019, n° 3, pp. 1-30.
- DE OLIVEIRA, D.D., PINHEIRO, J.W., NICOLAO FONSECA, N.A. & OBA, A., 2012. Performance of broiler chickens fed with sunflower cake. *Semina-Ciencias Agrarias*, Vol. 33, n° 5, pp. 1979-1990.
- DELANOUE, E., DOCKES, A.-C., CHOUTEAU, A., ROGUET, C. et PHILIBERT, A., 2018. Regards croisés entre éleveurs et citoyens français : vision des citoyens sur l'élevage et point de vue des éleveurs sur leur perception par la société. *INRAE Productions Animales*. Vol. 31, n° 1, pp. 51-68.
- DIAZ, D., MORLACCHINI, M., MASOERO, F., MOSCHINI, M., FUSCONI, G. & PIVA, G., 2006. Pea seeds (*Pisum sativum*), faba beans (*Vicia faba* var. *minor*) and lupin seeds (*Lupinus albus* var. *multitalia*) as protein sources in broiler diets: effect of extrusion on growth performance. *Italian Journal of Animal Science*, Vol. 5, n° 1, pp. 43-53.
- DISETLHE, A.R.P., MARUME, U. & MLAMBO, V., 2018. Humic acid and enzymes inclusion in canola-based diets generate different responses in growth performance, protein utilization dynamics, and hemato-biochemical parameters in broiler chickens. *Poultry Science*, Vol. 97, n° 8, pp. 2745-2753.
- DRURY, L.N., BEARD, C.W. & HOPKINS, S.R., 1969. An Isolation Cabinet System for Avian Disease Research. *Avian Diseases*, Vol. 13, n° 2, pp. 400-412.
- EUROPEAN COMMISSION, 2019. United States is Europe's main soya beans supplier with imports up by 112%. *European Commission*. Disponible sur: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_19_161.
- EUROPEAN PARLIAMENT, 2011. The EU protein deficit: what Solution for a long-standing Problem? Disponible sur : https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-7-2011-0026_EN.pdf?redirect.
- EVENSON, R.E. & GOLLIN, D., 2003. Assessing the Impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. *Science*, Vol. 300, n° 5620, pp. 758-762.
- FALLON, D., 1965. Eatometer: a device for continuous recording of free-feeding behavior. *Science (New York, N.Y.)*, Vol. 148, n° 3672, pp. 977-978.

- FARIA, P.B., VIEIRA, J.O., SILVA, J.N., RODRIGUES, A.Q., SOUZA, X.R., SANTOS, F.R. & PEREIRA, A.A., 2011. Performance and carcass characteristics of free-range broiler chickens fed diets containing alternative feedstuffs. *Brazilian Journal of Poultry Science*, Vol. 13, n° 3, pp. 211-216.
- FIGUEIREDO, D., MURAKAMI, A., PEREIRA, M., FURLAN, A. & TORAL, F., 2003. Performance and duodenum mucous morphometry of broiler chickens fed canola meal, during the starting period. *Revista Brasileira de Zootecnia*, Vol. 32, pp. 1321-1329.
- FOLTYN, M., RADA, V., LICHOVNIKOVA, M. & DRAČKOVÁ, E., 2013. Effect of corn DDGS on broilers performance and meat quality. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, Vol. 61, pp. 59-64.
- FAOSTAT, 2021. Disponible sur: <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QA/visualize>.
- FRIES-CRAFT, K. & BOBECK, E.A., 2019. Evaluation of a high-protein DDGS product in broiler chickens: performance, nitrogen-corrected apparent metabolisable energy, and standardised ileal amino acid digestibility. *British Poultry Science*, Vol. 60, n° 6, pp. 749-756.
- GATES, R.S. & XIN, H., 2008. Extracting poultry behaviour from time-series weigh scale records. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 62, n° 1, pp. 8-14.
- GIULIANO, S., RYAN, M.R., VÉRICEL, G., RAMETTI, G., PERDRIEUX, F., JUSTES, E. & ALLETTO, L., 2016. Low-input cropping systems to reduce input dependency and environmental impacts in maize production: A multi-criteria assessment. *European Journal of Agronomy*, Vol. 76, pp. 160-175.
- GOH, Y.K., SHIRES, A., ROBBLEE, A.R. & CLANDININ, D.R., 1982. Influence of supplementary cellulolytic enzymes (driselase) on the performance of broilers fed rations containing rapeseed meal. *Canadian Journal of Animal Science*, Vol. 62, n° 1, pp. 269-273.
- GOPINGER, E., XAVIER, E.G., ELIAS, M.C., CATALAN, A. a. S., CASTRO, M.L.S., NUNES, A.P. & ROLL, V.F.B., 2014. The effect of different dietary levels of canola meal on growth performance, nutrient digestibility, and gut morphology of broiler chickens. *Poultry Science*, Vol. 93, n° 5, pp. 1130-1136.
- GORDY, J.F., 1974. Broilers. Dans: O.A. HANKE & J.L. SKINNER, *American poultry history, 1823-1973: an anthology overview of 150 years: people-places-progress*: American Poultry Historical Society, pp. 370-433.
- GROENEVELD, L.F., LENSTRA, J.A., EDING, H., TORO, M.A., SCHERF, B., PILLING, D., NEGRINI, R., FINLAY, E.K., JIANLIN, H., GROENEVELD, E. & WEIGEND, S., 2010. Genetic diversity in farm animals – a review. *Animal Genetics*, Vol. 41, n° s1, pp. 6-31.

- GROENEVELD E, KOVAČ M & MIELENZ N, 2010. *VCE User's Guide and Reference Manual, version 6.0*. Institute of Farm Animal Genetics; Neustadt, Germany:
- GRUMBLES, L.C., DELAPLANE, J.P. & HIGGINS, T.C., 1948. Continuous Feeding of Low Concentrations of Sulfaquinoxaline for the Control of Coccidiosis in Poultry. *Poultry Science*, Vol. 27, n° 5, pp. 605-608.
- GUETTIER, E., URVOIX, S., SERVANT, P., MIKA, A., BERGER, Q. & MIGNON-GRASTEAU, S., 2020. Mise au point d'un automate de consommation alimentaire pour volailles nommé BIRD-e: Bird Individual Ration Dispenser-electronic. *Cahier des Techniques de l'INRA*, Vol. 99, pp. 12-23.
- GULL, R.A. & WASHBURN, K.W., 1974. Genetic Changes in Efficiency of Feed Utilization of Chicks Maintaining Body Weight Constant. *Poultry Science*, Vol. 53, n° 3, pp. 1146-1154.
- HAFEZ, M. & ATTIA, Y., 2020. Challenges to the Poultry Industry: Current Perspectives and Strategic Future After the COVID-19 Outbreak. *Frontiers in Veterinary Science*, Vol. 7, pp. 516-531.
- HAVENSTEIN, G., FERKET, P. & QURESHI, M., 2003. Carcass composition and yield of 1957 versus 2001 broilers when fed representative 1957 and 2001 broiler diets. *Poultry Science*, Vol. 82, n° 10, pp. 1509-1518.
- HAVENSTEIN, G., FERKET, P., SCHEIDELER, S. & LARSON, B., 1994a. Growth, Livability, and Feed Conversion of 1957 Vs 1991 Broilers When Fed Typical 1957 and 1991 Broiler Diets. *Poultry Science*, Vol. 73, n° 12, pp. 1785-1794.
- HAVENSTEIN, G., FERKET, P., SCHEIDELER, S. & RIVES, D., 1994b. Carcass Composition and Yield of 1991 Vs 1957 Broilers When Fed Typical 1957 and 1991 Broiler Diets. *Poultry Science*, Vol. 73, n° 12, pp. 1795-1804.
- HENRIQUEZ, B., OLSON, M., HOY, C., JACKSON, M. & WOUUDA, T., 2018. Frost tolerance of faba bean cultivars (*Vicia faba* L.) in central Alberta. *Canadian Journal of Plant Science*, Vol. 98, n° 2, pp. 509-514.
- HERNANDEZ, F., LOPEZ, M.J., GARCIA, V., MARTINEZ, S., MEGIAS, M.D. & MADRID, J., 2011. Influence of cereal type and the inclusion of sunflower meal as a source of additional dietary fibre on nutrient retention, growth performance and digestive organ size in broilers from one to twenty-one days of age. *Animal Feed Science and Technology*, Vol. 165, n° 3-4, pp. 251-257
- HERTIG, E. & JACOBET, J., 2014. Atlantic-European area: past and future. *Atmospheric Science Letters*, Vol. 15, n° 4, pp. 314-320.

- HORVATOVIC, M.P., GLAMOCIC, D., ZIKIC, D. & DAPCEVIC HADNADJEV, T., 2015. Performance and Some Intestinal Functions of Broilers Fed Diets with Different Inclusion Levels of Sunflower Meal and Supplemented or Not with Enzymes. *Brazilian Journal of Poultry Science*, Vol. 17, n° 1, pp. 25-30.
- HOWIE, J.A., AVENDANO, S., TOLKAMP, B.J. & KYRIAZAKIS, I., 2011. Genetic parameters of feeding behavior traits and their relationship with live performance traits in modern broiler lines. *Poultry Science*, Vol. 90, n° 6, pp. 1197-1205.
- HOWIE, J.A., TOLKAMP, B.J., AVENDANO, S. & KYRIAZAKIS, I., 2009. A novel flexible method of split feeding behaviour into bouts. *Applied Animal Behaviour Science*, Vol. 116, pp. 101-109.
- HOWIE, J.A., TOLKAMP, B.J., BLEY, T. & KYRIAZAKIS, I., 2010. Short-term feeding behaviour has a similar structure in broilers, turkeys and ducks. *British Poultry Science*, Vol. 51, n° 06, pp. 714-724.
- HUBBARD, 2020. *Poulet de chair : Guide et recommandations nutritionnelles*. Disponible sur : https://www.hubbardbreeders.com/media/hep_guide_broiler_fr.pdf
- HUSSAIN, M., MIRZA, M.A., NAWAZ, H., ASGHAR, M. & AHMED, G., 2019. Effect of Exogenous Protease, Mannanase, and Xylanase Supplementation in Corn and High Protein Corn DDGS Based Diets on Growth Performance, Intestinal Morphology and Nutrient Digestibility in Broiler Chickens. *Brazilian Journal of Poultry Science*, Vol. 21, n° 4, pp. 1-10.
- HUYNH-TRAN, V.H., GILBERT, H. & DAVID, I., 2017. Genetic structured antedependence and random regression models applied to the longitudinal feed conversion ratio in growing Large White pigs. *Journal of Animal Science*, Vol. 95, n° 11, pp. 4752-4763.
- INRAE, 2020. Bird-e. Automate de consommation alimentaire pour volailles. Disponible sur: <https://www.feed-a-gene.eu/media/bird-e-automate-de-consommation-alimentaire-pour-volailles>.
- ITAVI, 2016. Performances techniques et coûts de production - Résultats 2015. Disponible sur: <https://www.itavi.asso.fr/content/performances-techniques-et-couts-de-production-resultats-2015>.
- ITAVI, 2019. *Performances techniques et couts de production en volailles de chair*. 2019.
- JENSEN, E.S., PEOPLES, M.B. & HAUGGAARD-NIELSEN, H., 2010. Faba bean in cropping systems. *Field Crops Research*, Vol. 115, n° 3, pp. 203-216.

- JEZIERNY, D., MOSENTHIN, R., SAUER, N. & EKLUND, M., 2010. In vitro prediction of standardised ileal crude protein and amino acid digestibilities in grain legumes for growing pigs. *Animal: An International Journal of Animal Bioscience*, Vol. 4, n° 12, pp. 1987-1996.
- JIMÉNEZ-MORENO, E., GONZÁLEZ-ALVARADO, J.M., GONZÁLEZ-SERRANO, A., LÁZARO, R. & MATEOS, G.G., 2009. Effect of dietary fiber and fat on performance and digestive traits of broilers from one to twenty-one days of age1. *Poultry Science*, Vol. 88, n° 12, pp. 2562-2574.
- JONES, P.J., TAHAMTANI, F.M., PEDERSEN, I.J., NIEMI, J.K. & RIBER, A.B., 2020. The Productivity and Financial Impacts of Eight Types of Environmental Enrichment for Broiler Chickens. *Animals: an open access journal from MDPI*, Vol. 10, n° 3, pp. 378-391.
- JUNG, B., BATAL, A.B. & MITCHELL, R., 2010. Effect of exogenous enzyme supplementation on performance and carcass characteristics of broilers fed distillers dried grains with solubles (DDGS). *Journal of Dairy Science*, Vol. 93, pp. 551-552.
- JUNG, B., MITCHELL, R.D. & BATAL, A.B., 2012. Evaluation of the use of feeding distillers dried grains with solubles in combination with canola meal on broiler performance and carcass characteristics. *Journal of Applied Poultry Research*, Vol. 21, n° 4, pp. 776-787.
- KACZMAREK, S.A., HEJDYSZ, M., KUBIŚ, M., NOWACZEWSKI, S., MIKUŁA, R. & RUTKOWSKI, A., 2020. Effects of feeding intact, ground and/or pelleted rapeseed on nutrient digestibility and growth performance of broiler chickens. *Archives of Animal Nutrition*, Vol. 74, n° 3, pp. 222-236.
- KALINOWSKI, A., MORAN, E. & WYATT, C., 2003. Methionine and cystine requirements of slow- and fast-feathering broiler males from three to six weeks of age. *Poultry Science*, Vol. 82, n° 9, pp. 1428-1437.
- KARUNAJEEWA, H., IJAGBUJI, E. & REECE, R., 1990. Effect of Dietary Levels of Rapeseed Meal and Polyethylene-Glycol on the Performance of Male Broiler-Chickens. *British Poultry Science*, Vol. 31, n° 3, pp. 545-555.
- KHAJALI, F., TAHMASEBI, M., HASSANPOUR, H., AKBARI, M.R., QUJEQ, D. & WIDEMAN, R.F., 2011. Effects of supplementation of canola meal-based diets with arginine on performance, plasma nitric oxide, and carcass characteristics of broiler chickens grown at high altitude. *Poultry Science*, Vol. 90, n° 10, pp. 2287-2294.
- KIISKINEN, T., 1983. The Effect of Diets Supplemented with Regent Rapeseed Meal on Performance of Broiler Chicks. *Annales Agriculturae Fenniae*, Vol. 22, n° 4, pp. 206-213.
- KIM, J.S., HOSSEINDOUST, A., INGALE, S.L., RATHI, P.C., LEE, S.H., CHOI, Y.H., KIM, M.J., KUMAR, A., PARK, S.O., OH, S.J. & CHAE, B.J., 2016. Effects of diet form and xylanase

- supplementation in a high maize distillers dried grains with solubles (DDGS) diet on performance, nutrient digestibility and non-starch polysaccharide degradation in broiler. *European Poultry Science*, Vol. 80, pp. 298-305.
- KIM, J.W., SANJAYAN, N., LETERME, P. & NYACHOTI, C.M., 2019. Relative bioavailability of phosphorus in high-protein sunflower meal for broiler chickens and effects of dietary phytase supplementation on bone traits, growth performance, and apparent ileal digestibility of nutrients. *Poultry Science*, Vol. 98, n° 1, pp. 298-305.
- KIM, Y.-U., CHOI, D.-H., BAN, H.-Y., SEO, B.-S., KIM, J. & LEE, B.-W., 2020. Temporal Patterns of Flowering and Pod Set of Determinate Soybean in Response to High Temperature. *Agronomy*, Vol. 10, n° 3, pp. 414-422.
- KOIVUNEN, E., PARTANEN, K., PERTTILA, S., PALANDER, S., TUUNAINEN, P. & VALAJA, J., 2016. Digestibility and energy value of pea (*Pisum sativum* L.), faba bean (*Vicia faba* L.) and blue lupin (narrow-leaf) (*Lupinus angustifolius*) seeds in broilers. *Animal Feed Science and Technology*, Vol. 218, pp. 120-127.
- KONIECZKA, P., CZERWINSKI, J., JANKOWIAK, J., ZABEK, K. & SMULIKOWSKA, S., 2019. Effects of Partial Replacement of Soybean Meal with Rapeseed Meal, Narrow-Leaved Lupin, Ddgs, and Probiotic Supplementation, on Performance and Gut Microbiota Activity and Diversity in Broilers. *Annals of Animal Science*, Vol. 19, n° 4, pp. 1115-1131.
- KUBENA, L.F., CHEN, T.C., DEATON, J.W. & REECE, F.N., 1974. Factors Influencing the Quantity of Abdominal Fat in Broilers: 3. Dietary Energy Levels. *Poultry Science*, Vol. 53, n° 3, pp. 974-978.
- KÜÇÜKYILMAZ, K., BOZKURT, M., ÇINAR, M., ÇATLI, A.U., BINTAS, E. & ERKEK, R., 2014. The effects of an organic rearing system and dietary supplementation of an essential oil mixture on performance and meat yield of slow-growing broilers in two seasons. *South African Journal of Animal Science*, Vol. 44, n° 4, pp. 360-370.
- KYRIAZAKIS, I. & TOLKAMP, B., 2011. Hunger and thirst. Dans: M.C. APPLEBY, J.A. MENCH, I.A.S. OLSSON & B.O. HUGHES (eds.), *Animal welfare*. Wallingford: CABI, pp. 44-63.
- LAISSE, S., BAUMONT, R., DUSART, L., GAUDRÉ, D., ROUILLÉ, B., BENOIT, M., VEYSSET, P., RÉMOND, D. & PEYRAUD, J.-L., 2019. L'efficience nette de conversion des aliments par les animaux d'élevage : une nouvelle approche pour évaluer la contribution de l'élevage à l'alimentation humaine. *INRA Productions Animales*, Vol. 31, n° 3, pp. 269-288.

- LATHUILLIÈRE, M.J., MIRANDA, E.J., BULLE, C., COUTO, E.G. & JOHNSON, M.S., 2017. Land occupation and transformation impacts of soybean production in Southern Amazonia, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 149, pp. 680-689.
- LAUDADIO, V., BASTONI, E., INTRONA, M. & TUFARELLI, V., 2013. Production of low-fiber sunflower (*Helianthus annuus* L.) meal by micronization and air classification processes. *CyTA - Journal of Food*, Vol. 11, n° 4, pp. 398-403.
- LAWLOR, T.J., TSURUTA, S., KLEI, L. & MISZTAL, I., 2002. Use of a random regression model to investigate changes in genetic parameters over time. *7th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production*, 19-23 Aout 2002, Montpellier, France, pp. 6-9.
- LE BIHAN-DUVAL, E., DEBUT, M., BERRI, C.M., SELLIER, N., SANTÉ-LHOUELIER, V., JÉGO, Y. & BEAUMONT, C., 2008. Chicken meat quality: genetic variability and relationship with growth and muscle characteristics. *BMC Genetics*, Vol. 9, n° 1, pp. 53-59.
- LÊ, S., JOSSE, J. & HUSSON, F., 2008. FactoMineR : An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, Vol. 25, n° 1, pp. 1-18.
- LECCE, J., 1969. Rearing Colostrum-Free Pigs in an Automatic Feeding Device. *Journal of Animal Science*, Vol. 28, n° 1, pp. 27-33.
- LEE, K.H., OLOMU, J.M. & SIM, J.S., 1991. Live performance, carcass yield, protein and energy retention of broiler chickens fed canola and flax full-fat seeds and the restored mixtures of meal and oil. *Canadian journal of animal science*, Vol. 71, n° 3, pp. 897-903.
- LEINONEN, I. & KYRIAZAKIS, I., 2016. How can we improve the environmental sustainability of poultry production? *The Proceedings of the Nutrition Society*, Vol. 75, n° 3, pp. 265-273.
- LEINONEN, I., WILLIAMS, A.G., WALLER, A.H. & KYRIAZAKIS, I., 2013. Comparing the environmental impacts of alternative protein crops in poultry diets: The consequences of uncertainty. *Agricultural Systems*, Vol. 121, pp. 33-42.
- LESSIRE, M., MÉDA, B., DUSART, L., HALLOUIS, J.-M., BORDEAU, T., SOUCHET, C., MERCERAND, F., HATTÉ, C., BOUVAREL, I. & BERRI, C., 2015. Remplacement du tourteau de soja par des matières premières riches en protéines : évaluation multicritère chez le poulet de chair à croissance intermédiaire. *Onzièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours, les 25 et 26 mars 2015*. pp. 893-898.
- LESSIRE, M., PRIMOT, Y., CORRENT, E., PAULINE, F., TESSERAUD, S. & BERRI, C., 2013. Lysine supply in finishing broilers: effect on performances and meat quality. Dans: J.W. OLTJEN, E. KEBREAB & H. LAPIERRE (eds.), *Energy and protein metabolism and nutrition in sustainable animal production*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers. pp. 209-210.

- LI, G., ZHAO, Y., HAILEY, R., ZHANG, N., LIANG, Y. & PURSWELL, J.L., 2019. An ultra-high frequency radio frequency identification system for studying individual feeding and drinking behaviors of group-housed broilers. *Animal*, Vol. 13, n° 9, pp. 2060-2069.
- LI, G., ZHAO, Y., PURSWELL, J.L. & MAGEE, C., 2021. Effects of feeder space on broiler feeding behaviors. *Poultry Science*, Vol. 100, n° 4, pp. 101016-101026.
- LIAQAT, S., MAHMOOD, S., AHMAD, S., KAMRAN, Z. & KOUTOULIS, K.C., 2016. Replacement of canola meal with Moringa oleifera leaf powder affects performance and immune response in broilers. *Journal of Applied Poultry Research*, Vol. 25, n° 3, pp. 352-358.
- LIU, Q.W., FENG, J.H., CHAO, Z., CHEN, Y., WEI, L.M., WANG, F., SUN, R.P. & ZHANG, M.H., 2016. The influences of ambient temperature and crude protein levels on performance and serum biochemical parameters in broilers. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, Vol. 100, n° 2, pp. 301-308.
- LIU, Y.L., YI, G.F., SONG, G.L., HOU, Y.Q., HUANG, J.W., VÁZQUEZ-AÑÓN, M. & KNIGHT, C.D., 2007. Impact of feeding 2-hydroxy-4-(methylthio)butanoic acid and DL-methionine supplemented maize-soybean-rapeseed meal diets on growth performance and carcass quality of broilers. *British Poultry Science*, Vol. 48, n° 2, pp. 190-197.
- LOAR, R.E., MORITZ, J.S., DONALDSON, J.R. & CORZO, A., 2010. Effects of feeding distillers dried grains with solubles to broilers from 0 to 28 days posthatch on broiler performance, feed manufacturing efficiency, and selected intestinal characteristics. *Poultry Science*, Vol. 89, n° 10, pp. 2242-2250.
- LOSINGER, W.C., 1998. Feed-conversion ratio of finisher pigs in the USA. *Preventive Veterinary Medicine*, Vol. 36, n° 4, pp. 287-305.
- LOTT, B.D., SIMMONS, J.D. & MAY, J.D., 1992. An Automated Feed and Water Consumption Measuring System for Poultry Research. *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 8, n° 4, pp. 521-523.
- MAGDELAINE, P., COULETEL, G. & DUVALEIX-TREGUER, S., 2015. La contractualisation dans le secteur aviculture chair. *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*, n° 345, pp. 73-86.
- MACLEOD, M., GERBER, P., MOTTET, A., TEMPIO, G., FALCUCCI, A., OPIO, C., VELLINGA, T., HENDERSON, B. et STEINFELD, H., 2013. *Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains – a global life cycle assessment*. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- MALHER, X., MAGDELAINE, P. & DUCLOS M., J., 2018. Diversité et résilience dans les filières avicoles. *Innovations Agronomiques*, Vol. 68, pp. 107-127.

- MANYEULA, F., MLAMBO, V., MARUME, U. & SEBOLA, N.A., 2019. Nutrient digestibility, haemo-biochemical parameters and growth performance of an indigenous chicken strain fed canola meal-containing diets. *Tropical Animal Health and Production*, Vol. 51, n° 8, pp. 2343-2350.
- MARCHESI, J.A.P., ONO, R.K., CANTÃO, M.E., IBELLI, A.M.G., PEIXOTO, J. de O., MOREIRA, G.C.M., GODOY, T.F., COUTINHO, L.L., MUNARI, D.P. & LEDUR, M.C., 2021. Exploring the genetic architecture of feed efficiency traits in chickens. *Scientific Reports*, Vol. 11, n° 1, pp. 4622-4634.
- MARKS, H.L., 1991. Feed efficiency changes accompanying selection for body weight in chickens and quail. *World's Poultry Science Journal*, Vol. 47, n° 3, pp. 197-212.
- MCNAUGHTON, J., ROBERTS, M., RICE, D., SMITH, B., HONG, B., DELANEY, B. & IIAMS, C., 2014. Comparison of broiler performance and carcass yields when fed diets containing genetically modified canola meal from event DP-circle divide 73496-4, near-isogenic canola meal, or commercial canola meals. *Poultry Science*, Vol. 93, n° 7, pp. 1713-1723.
- MÉDA, B., DUSART, L., LESSIRE, M., HALLOUIS, J.M., BORDEAU, T., SOUCHET, C., MERCERAND, F., HATTÉ, C., BOUVAREL, I. & BERRI, C., 2015. Replacing soybean meal by alternative protein sources: multicriteria assessment of a «Label Rouge» chicken production system. *Actes des 11èmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours, France, les 25 et 26 mars 2015*, pp. 1082-1087.
- 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*, Vol. 15, n° 1, pp. 100024-100035.
- MENDES, M. & AKKARTAL, E., 2007. Canonical correlation analysis for studying the relationships between pre- and post slaughter traits of Ross 308 broiler chickens. *Archiv Fur Geflugelkunde*, Vol. 71, n° 6, pp. 267-271.
- METAYER-COUSTARD, S., FRANZONI, A., RÉHAULT-GOUBERT, S., COLLIN, A., TRAVEL, A., RAYNAUD, E., BAUMARD, Y., DELAVEAU, J., RAT, C., AUDOUIN, E., GODET, E., BRIONNE, A., BERRI, C. & DUVAL, E., 2019. Variation in energy stores: impact on reproduction and egg characteristics in meat-type strains. *13^e Journées de la recherche avicole et des palmipèdes à foie gras.*, Mars 2019, Tours, France, pp. 206-209.

- MÉTAYER-COUSTARD, S., TESSERAUD, S., PRAUD, C., ROYER, D., BORDEAU, T., COUDERT, E., CAILLEAU-AUDOUIN, E., GODET, E., DELAVEAU, J., LE BIHAN-DUVAL, E. & BERRI, C., 2021. Early Growth and Protein-Energy Metabolism in Chicken Lines Divergently Selected on Ultimate pH. *Frontiers in Physiology*, Vol. 12, pp. 144-157.
- MIGNON-GRASTEAU, S., 2007. Prise en compte des interactions entre génotype et environnement dans les productions avicoles. *Septièmes Journées de la Recherche Avicole, Tours, 28 et 29 mars 2007*. Tours. pp 386-454
- MIGNON-GRASTEAU, S., BERGER, Q., GUETTIER, E. & LE BIHAN-DUVAL, E., 2021. Mignon-Grasteau, S., Q. Berger, E. Guettier, and E. Le Bihan-Duval. 2021. New advances based on our feed station and its use for feed efficiency phenotyping. *72th Eur Assoc Anim Prod*. Davos.
- MIKA, A., GUETTIER, E., BERGER, Q., BIHAN-DUVAL, E.L., BERNARD, J., PAMPOUILLE, E., BOUVAREL, I. y MIGNON-GRASTEAU, S., 2021. Eva-HD - Mise au point d'un automate de consommation alimentaire pour volailles « BIRD-e: Bird Individual Ration Dispenser-electronic ». *Innovations Agronomiques*, Vol. 82, pp. 137-149.
- MIN, Y.N., HANCOCK, A., YAN, F., LU, C., COTO, C., KARIMI, A., PARK, J.H., LIU, F.Z. & WALDROUP, P.W., 2009. Use of combinations of canola meal and distillers dried grains with solubles in broiler starter diets. *Journal of Applied Poultry Research*, Vol. 18, n° 4, pp. 725-733.
- MIN, Y.N., LI, L.L., LIU, S.K., ZHANG, J., GAO, Y.P. & LIU, F.Z., 2015. Effects of dietary distillers dried grains with solubles (DDGS) on growth performance, oxidative stress, and immune function in broiler chickens. *Journal of Applied Poultry Research*, Vol. 24, n° 1, pp. 23-29.
- MIRAKZEHI, M.T., TAHMASBI, A. & GHAZI, S., 2010. The Effect of Different Treatments of Rapeseed Meal on Nitrogen Digestibility and Metabolizable Energy in Broilers and Chicks Performance. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, Vol. 9, n° 19, pp. 2517-2521.
- MOLENAAR, R., REIJRINK, I. a. M., MEIJERHOF, R. & VAN DEN BRAND, H., 2009. Correlation Between Chick Length and Chick Weight at Hatch and Slaughter Weight and Breast Yield in Broilers. Dans: P.M. HOCKING (ed.), *Biology of Breeding Poultry*. Wallingford: Cabi Publishing-C a B Int, pp. 446-486.
- MONTAZER-SADEGH, R., EBRAHIM-NEZHAD, Y. & MAHERI-SIS, N., 2008. Replacement of Different Levels of Rapeseed Meal with Soybean Meal on Broilers Performance. *Asian Journal of Animal and Veterinary Advances*, Vol. 3, n° 5, pp. 278-285.

- MORAES, P.O., NOVELINI, L., KRABBE, E.L., KAWSKI, V.L., NUNES, K., CORCINI, C.D., VARELLA, A.S. & XAVIER, E.G., 2018. Growth performance, morphometric analysis of the intestinal mucosa and thyroid of broiler fed canola meal. *Arquivo Brasileiro De Medicina Veterinaria E Zootecnia*, Vol. 70, n° 1, pp. 187-194.
- MOTTET, A. & TEMPIO, G., 2017. Global poultry production: current state and future outlook and challenges. *World's Poultry Science Journal*, Vol. 73, n° 2, pp. 245-256.
- MUSHTAQ, T., SARWAR, M., AHMAD, G., MIRZA, M.A., AHMAD, T., NOREEN, U., MUSHTAQ, M.M.H. & KAMRAN, Z., 2009. Influence of sunflower meal based diets supplemented with exogenous enzyme and digestible lysine on performance, digestibility and carcass response of broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology*, Vol. 149, n° 3-4, pp. 275-286.
- MUSHTAQ, T., SARWAR, M., AHMAD, G., MIRZA, M.A., NAWAZ, H., MUSHTAQ, M.M.H. & NOREEN, U., 2007. Influence of canola meal-based diets supplemented with exogenous enzyme and digestible lysine on performance, digestibility, carcass, and immunity responses of broiler chickens. *Poultry Science*, Vol. 86, n° 10, pp. 2144-2151.
- MUSHTAQ, T., SARWAR, M., AHMAD, G., NISA, M.U. & JAMIL, A., 2006. The influence of exogenous multienzyme preparation and graded levels of digestible lysine in sunflower meal-based diets on the performance of young broiler chicks two weeks posthatching. *Poultry Science*, Vol. 85, n° 12, pp. 2180-2185.
- NALLE, C.L., RAVINDRAN, V. & RAVINDRAN, G., 2010. Evaluation of Faba Beans, White Lupins and Peas as Protein Sources in Broiler Diets. *International Journal of Poultry Science*, Vol. 9, n° 6, pp. 567-573.
- NASSIRI MOGHADDAM, H., SALARI, S., ARSHAMI, J., GOLIAN, A. et MALEKI, M., 2012. Evaluation of the nutritional value of sunflower meal and its effect on performance, digestive enzyme activity, organ weight, and histological alterations of the intestinal villi of broiler chickens. *Journal of Applied Poultry Research*.. Vol. 21, n° 2, pp. 293-304.
- N'DRI, A.L., SELIER, N., TIXIER-BOICHARD, M., BEAUMONT, C. & MIGNON-GRASTEAU, S., 2007. Genotype by environment interactions in relation to growth traits in slow growing chickens. *Genetics Selection Evolution*, Vol. 39, n° 5, pp. 513-528.
- NEUMAIER, A. & GROENEVELD, E., 1998. Restricted Maximum Likelihood Estimation of Covariances in Sparse Linear Models. *Genetics Selection Evolution*, Vol. 30, pp. 3-26.

- NGUYEN, C.V., SMULIKOWSKA, S. & MIECZKOWSKA, A., 2003. Effect of linseed and rapeseed or linseed and rapeseed oil on performance, slaughter yield and fatty acid deposition in edible parts of the carcass in broiler chickens. *Journal of Animal and Feed Sciences*, Vol. 12, n° 2, pp. 271-288.
- NGUYEN, T.T.H., BOUVAREL, I., PONCHANT, P. & VAN DER WERF, H.M.G., 2012. Using environmental constraints to formulate low-impact poultry feeds. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 28, pp. 215-224.
- OCDE/FAO, 2017. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2017-2026*. Éditions OCDE, Paris.
- OLUKOSI, O.A., KASPRZAK, M.M., KIGHTLEY, S., CARRE, P., WISEMAN, J. & HOUDIJK, J.G.M., 2017. Investigations of the nutritive value of meals of double-low rapeseed and its influence on growth performance of broiler chickens. *Poultry Science*, Vol. 96, n° 9, pp. 3338-3350.
- OZHAN, N., SIMSEK, U.G. & OZCELIK, M., 2016. Comparison of floor and cage housing systems in terms of some welfare assessments in broiler. *Ankara Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*, Vol. 63, n° 3, pp. 317-322.
- OZTURK, E., 2017. Performance of broilers fed with different levels of sunflower meal supplemented with or without enzymes. *Indian Journal of Animal Research*, Vol. 51, n° 3, pp. 495-500.
- PAMPOUILLE, E., DUSART, L., BONNOUVRIER, A., DANIEL, J., DAUGUET, S., DÉSOULÉ, M., HEUZE, V., LAMBERT, W., BOURHIS, L., CADRE, L., MARTIN, N., MÉDA, B., MICHAUD, c, MIGNON-GRASTEAU, S., NARCY, A., PEYRONNET, C., QUINSAC, A., RECOULES, E., SCHOULER, C., TORMO, E., TRAN, G., VILARIÑO, M., WILFART, A. & BOUVAREL, I., 2021. VOCALIM -Mieux valoriser des matières premières métropolitaines dans l'alimentation des poulets de chair pour améliorer l'autonomie protéique française. *Innovations Agronomiques*, Vol. 82, pp. 425-440.
- PAYVASTEGAN, S., FARHOOMAND, P., DANESHYAR, M. & GHAFARI, M., 2017. Evaluation of Different Levels of Canola Meal on Performance, Organ Weights, Hepatic Deiodinase Gene Expression and Thyroid Morphology in Broiler Chickens. *Journal of Poultry Science*, Vol. 54, n° 4, pp. 282-291.
- PAYVASTEGAN, S., FARHOOMAND, P. & DELFANI, N., 2013. Growth Performance, Organ Weights and, Blood Parameters of Broilers Fed Diets Containing Graded Levels of Dietary Canola Meal and Supplemental Copper. *Journal of Poultry Science*, Vol. 50, n° 4, pp. 354-363.

- PELLETIER, N., PIROG, R. & RASMUSSEN, R., 2010. Comparative life cycle environmental impacts of three beef production strategies in the Upper Midwestern United States. *Agricultural Systems*, Vol. 103, n° 6, pp. 380-389.
- PERELLA, F., MUGNAI, C., BOSCO, A.D., SIRRI, F., CESTOLA, E. & CASTELLINI, C., 2009. Faba bean (*Vicia faba* var. *minor*) as a protein source for organic chickens: performance and carcass characteristics. *Italian Journal of Animal Science*, Vol. 8, n° 4, pp. 575-584.
- PETRACCI, M., MUDALAL, S., SOGLIA, F. & CAVANI, C., 2015. Meat quality in fast-growing broiler chickens. *Worlds Poultry Science Journal*, Vol. 71, n° 2, pp. 363-373.
- PEYRONNET, C., LACAMPAGNE, J.-P., CADRE, P.L. & PRESSEDA, F., 2014. Les sources de protéines dans l'alimentation du bétail en France : la place des oléoprotéagineux. *OCL*, Vol. 21, n° 4, pp. D402.
- PFIRTER, H., HALTER, H. & LUTHY, J., 1982. Residues of Rapeseed Processing as Feedstuffs for Growing-Pigs and Poultry .1. Growth-Performance and Organ Development. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, Vol. 52, n° 2, pp. 217-217.
- PLAVNIK, I., MACOVSKY, B. & SKLAN, D., 2002. Effect of feeding whole wheat on performance of broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology*, Vol. 96, n° 3, pp. 229-236.
- POKROVSKY, V. & LE MAGNEN, J., 1963. *Réalisation d'un dispositif d'enregistrement graphique continu et automatique de la consommation alimentaire du rat blanc*. Masson Editeur, Paris, France.
- PUMA, M.C., XIN, H., GATES, R.S. & BURNHAM, D.J., 2001. An instrumentation system for studying feeding and drinking behavior of individual poultry. *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 17, n° 3, pp. 365-374.
- PYM, R.A.E. & NICHOLLS, P.J., 1979. Selection for food conversion in broilers: Direct and correlated responses to selection for body-weight gain, food consumption and food conversion ratio. *British Poultry Science*, Vol. 20, n° 1, pp. 73-86.
- QUINTON, J.N., GOVERS, G., VAN OOST, K. & BARDGETT, R.D., 2010. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. *Nature Geoscience*, Vol. 3, n° 5, pp. 311-314.
- RAMA RAO, S.V., RAJU, M.V.L.N., PANDA, A.K. & REDDY, M.R., 2006. Sunflower seed meal as a substitute for soybean meal in commercial broiler chicken diets. *British Poultry Science*, Vol. 47, n° 5, pp. 592-598.

- RANDALL, M., HERBERT, M. & HEPHERD, R., 1976. Automatic Pneumatic Conveying and Weight-Dispensing System for Floor-Feeding Pellets to Pigs. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 21, n° 3, pp. 233-245.
- RAZA, S., ASHRAF, M., PASHA, T.N., LATIF, F., BABAR, M.E. & HASHMI, A.S., 2009. Effect of Enzyme Supplemented High Fibre Sunflower Meal on Performance of Broilers. *Pakistan Journal of Zoology*, Vol. 41, n° 1, pp. 57-64.
- REBOLE, A., RODRIGUEZ, M.L., ORTIZ, L.T., ALZUETA, C., CENTENO, C., VIVEROS, A., BRENES, A. & ARIJA, I., 2006. Effect of dietary high-oleic acid sunflower seed, palm oil and vitamin E supplementation on broiler performance, fatty acid composition and oxidation susceptibility of meat. *British Poultry Science*, Vol. 47, n° 5, pp. 581-591.
- REED, W.L. & CLARK, M.E., 2011. Beyond Maternal Effects in Birds: Responses of the Embryo to the Environment. *Integrative and Comparative Biology*, Vol. 51, n° 1, pp. 73-80.
- REZAEIPOUR, V., AGHARAJABI, A., GHAREVEISI, S. & NOROZI, M., 2015. Effects of Full-Fat Canola Seed with an Exogenous Enzyme Supplementation on Performance, Carcass Characteristics and Thyroid Hormones of Broiler Chickens. *Journal of Animal and Plant Sciences*, Vol. 25, n° 5, pp. 1233-1237.
- ROLLER, W. & TEAGUE, H., 1970. Automatic Paste Feeding System for Pigs. *Agricultural Engineering*, Vol. 51, n° 5, pp. 301.
- ROY, S. & SARKAR, S.K., 2016. RFID based real time system for early detection of Avian Influenza for poultry based industry. *2016 International Conference on Microelectronics, Computing and Communications (MicroCom)*. Durgapur, India: IEEE, pp. 1-6.
- RUTKOWSKI, A., KACZMAREK, S., SZCZYRKOWSKA, A. & JOZEFIAK, D., 2012. The effect of particle size of full-fat rapeseed and of multi-carbohydrase enzyme supplementation on nutrient digestibility and performance in broilers. *Journal of Animal and Feed Sciences*, Vol. 21, n° 2, pp. 324-333.
- SADEGHI, A., TOGHYANI, M. & GHEISARI, A., 2015. Effect of various fiber types and choice feeding of fiber on performance, gut development, humoral immunity, and fiber preference in broiler chicks. *Poultry Science*, Vol. 94, n° 11, pp. 2734-2743.
- SAKI, A.A., MAHMOUDI, H., TABATABAEI, M.M. & AHMADI, A., 2008. Amino acid digestibility and energy value of yellow-seeded rapeseed meal in broiler chicken performance. *Journal of Applied Animal Research*, Vol. 33, n° 1, pp. 21-24.
- SALEH, A.A., HAYASHI, K., IJIRI, D. & OHTSUKA, A., 2015. Effect of feeding *Aspergillus awamori* and canola seed on the growth performance and muscle fatty acid profile in broiler chicken. *Animal Science Journal*, Vol. 86, n° 3, pp. 305-311.

- SANTOS, F.B.O., SHELDON, B.W., SANTOS, A.A. & FERKET, P.R., 2008. Influence of Housing System, Grain Type, and Particle Size on Salmonella Colonization and Shedding of Broilers Fed Triticale or Corn-Soybean Meal Diets. *Poultry Science*, Vol. 87, n° 3, pp. 405-420.
- SAS INSTITUTE INC., 2013. *SAS/STAT® 13.1 User's Guide*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- SCHAEFFER, L.R., 2004. Application of random regression models in animal breeding. *Livestock Production Science*, Vol. 86, n° 1, pp. 35-45.
- SCHAT, K.A., 2016. History of the First-Generation Marek's Disease Vaccines: The Science and Little-Known Facts. *Avian Diseases*, Vol. 60, n° 4, pp. 715-724.
- SCHAUBERGER, B., BEN-ARI, T., MAKOWSKI, D., KATO, T., KATO, H. & CIAIS, P., 2018. Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century. *Scientific Reports*, Vol. 8, n° 1, pp. 16865-16877.
- SHARIF, M., SHAHZAD, M.A., REHMAN, S., KHAN, S., ALI, R., KHAN, M.L. & KHAN, K., 2012. Nutritional Evaluation of Distillery Sludge and Its Effect as a Substitute of Canola Meal on Performance of Broiler Chickens. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, Vol. 25, n° 3, pp. 401-409.
- SHARIFI, S.D., GOLESTANI, G., YAGHOBFAR, A., KHADEM, A. & PASHAZANUSSI, H., 2013. Effects of supplementing a multienzyme to broiler diets containing a high level of wheat or canola meal on intestinal morphology and performance of chicks. *Journal of Applied Poultry Research*, Vol. 22, n° 4, pp. 671-679.
- SIBBALD, I.R., 1976. A bioassay for true metabolizable energy in feedingstuffs. *Poultry Science*, Vol. 55, n° 1, pp. 303-308.
- SIEGEL, P., HONAKER, C.F. & RAUW, W., 2008. Selection for high production in poultry. Dans: RAUW, W., *Resources Allocation Theory Applied to Farm Animal Production*, pp. 230-242
- SIEGEL, P.B., 2014. Evolution of the Modern Broiler and Feed Efficiency. *Annual Review of Animal Biosciences*, Vol. 2, n° 1, pp. 375-385.
- SIMSEK, U.G., ERISIR, M., CIFTCI, M. & TATLI SEVEN, P., 2014. Effects of Cage and Floor Housing Systems on Fattening Performance, Oxidative Stress and Carcass Defects in Broiler Chicken. *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*, Vol. 20, n° 5, pp. 727-733.
- SKLAN, D., SMIRNOV, A. & PLAVNIK, I., 2003. The effect of dietary fibre on the small intestines and apparent digestion in the turkey. *British Poultry Science*, Vol. 44, n° 5, pp. 735-740.
- SMITH, J.S.C., SMITH, O.S. & LAMKEY, K.R., 2005. Maize Breeding. *Maydica*, Vol. 50, n° 3-4, pp. 185-192.

SMITH, S.N., DAVIS, M.E. & LOERCH, S.C., 2010. Residual feed intake of Angus beef cattle divergently selected for feed conversion ratio. *Livestock Science*, Vol. 132, n° 1, pp. 41-47.

STEINFELD, H., GERBER, P., WASSENAAR, T.D., NATIONS, F. and A.O. of the U., CASTEL, V., ROSALES, M., M, M.R. & HAAN, C. de, 2006. *Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options*. Food & Agriculture Org.

SWIATKIEWICZ, S. & KORELESKI, J., 2008. The use of distillers dried grains with soluble (DDGS) in poultry nutrition. *World s Poultry Science Journal*, Vol. 64, pp. 257-266.

SYAFWAN, S., WERMINK, G.J.D., KWAKKEL, R.P. & VERSTEGEN, M.W.A., 2012. Dietary self-selection by broilers at normal and high temperature changes feed intake behavior, nutrient intake, and performance. *Poultry Science*, Vol. 91, n° 3, pp. 537-549.

Tables de composition et de valeur nutritionnelle des aliments pour animaux INRA CIRAD AFZ, 2021. Disponible à l'adresse : <https://feedtables.com/fr>

TAHERI, H.R. & TAHERKHANI, S., 2015. Effect of Phytase Superdoses and Citric Acid on Growth Performance, Plasma Phosphorus and Tibia Ash in Broilers Fed Canola Meal-Based Diets Severely Limited in Available Phosphorus. *Poultry Science Journal*, Vol. 3, n° 1, pp. 27-36.

TALLENTIRE, C.W., LEINONEN, I. & KYRIAZAKIS, I., 2016. Breeding for efficiency in the broiler chicken: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 36, n° 4, pp. 66-82.

TALLENTIRE, C.W., MACKENZIE, S.G. & KYRIAZAKIS, I., 2018. Can novel ingredients replace soybeans and reduce the environmental burdens of European livestock systems in the future? *Journal of Cleaner Production*, Vol. 187, pp. 338-347.

TAVERNARI, F. de C., DUTRA JUNIOR, W.M., TEIXEIRA ALBINO, L.F., ROSTAGNO, H.S., VIEIRA, R.A. & DA SILVA, C.R., 2009. Effect of different levels of sunflower meal in diets on the performance of broiler chickens. *Revista Brasileira De Zootecnia-Brazilian Journal of Animal Science*, Vol. 38, n° 9, pp. 1745-1750.

TAVERNARI, F.C., ALBINO, L.F.T., MORATA, R.L., DUTRA JÚNIOR, W.M., ROSTAGNO, H.S. & VIANA, M.T.S., 2008. Inclusion of sunflower meal, with or without enzyme supplementation, in broiler diets. *Brazilian Journal of Poultry Science*, Vol. 10, n° 4, pp. 233-238.

- TAYLOR, M.L., STANISIEWSKI, E.P., RIORDAN, S.G., NEMETH, M.A., GEORGE, B. & HARTNELL, G.F., 2004. Comparison of broiler performance when fed diets containing roundup ready (Event RT73), nontransgenic control, or commercial canola meal. *Poultry Science*, Vol. 83, n° 3, pp. 456-461.
- TEAM, R.C., 2013. *R: A language and environment for statistical computing.*: Vienna, Austria.
- THACKER, P. & WIDYARATNE, G., 2012. Effects of expeller pressed camelina meal and/or canola meal on digestibility, performance and fatty acid composition of broiler chickens fed wheat-soybean meal-based diets. *Archives of Animal Nutrition*, Vol. 66, n° 5, pp. 402-415.
- TOGHYANI, M., MOHAMMADSALEHI, A., GHEISARI, A. & TABEIDIAN, S.A., 2009. The effect of low-glucosinolate rapeseed meal in diets with multi-enzyme supplement on performance and protein digestibility in broiler chicks. *Journal of Animal and Feed Sciences*, Vol. 18, n° 2, pp. 313-321.
- TOGHYANI, M., WU, S.B., PÉREZ-MALDONADO, R.A., IJI, P.A. & SWICK, R.A., 2017. Performance, nutrient utilization, and energy partitioning in broiler chickens offered high canola meal diets supplemented with multicomponent carbohydrase and mono-component protease. *Poultry Science*, Vol. 96, n° 11, pp. 3960-3972.
- TONA, K., BAMELIS, F., DE KETELAERE, B., BRUGGEMAN, V., MORAES, V., BUYSE, J., ONAGBESAN, O. & DECUYPERE, E., 2003. Effects of egg storage time on spread of hatch, chick quality, and chick juvenile growth. *Poultry Science*, Vol. 82, n° 5, pp. 736-741.
- TU, X., DU, S., TANG, L., XIN, H. & WOOD, B., 2011. A real-time automated system for monitoring individual feed intake and body weight of group housed turkeys. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 75, n° 2, pp. 313-320.
- TUUNAINEN, P., KOIVUNEN, E., VALAJA, J., VALKONEN, E., HIIDENHOVI, J., TUPASELA, T. & HONGISTO, M., 2016. Effects of dietary rapeseed meal and peas on the performance and meat quality of broilers. *Agricultural and Food Science*, Vol. 25, n° 1, pp. 22-33.
- USAYRAN, N.N., SHA'AR, H., BARBOUR, G.W., YAU, S.K., MAALOUF, F. & FARRAN, M.T., 2014. Nutritional value, performance, carcass quality, visceral organ size, and blood clinical chemistry of broiler chicks fed 30% tannin-free fava bean diets. *Poultry Science*, Vol. 93, n° 8, pp. 2018-2027.
- VAN HORNE, P.L.M., 2018. Competitiveness of the EU poultry meat sector, base year 2017: international comparison of production costs. Wageningen: Wageningen Economic Research. Disponible à l'adresse : <https://research.wur.nl/en/publications/7b6c31d2-2daa-4b95-8d3b-6a78d5ca0d82>.

- WANG, L., ZHANG, Y., KONG, L., WANG, Z., BAI, H., JIANG, Y., BI, Y., CHANG, G. & CHEN, G., 2021. Effects of rearing system (floor vs. cage) and sex on performance, meat quality and enteric microorganism of yellow feather broilers. *Journal of Integrative Agriculture*, Vol. 20, n° 7, pp. 1907-1920.
- WANG, M.-S., THAKUR, M., PENG, M.-S., JIANG, Y., FRANTZ, L.A.F., LI, M., ZHANG, J.-J., WANG, S., PETERS, J., OTECKO, N.O., SUWANNAPOOM, C., GUO, X., ZHENG, Z.-Q., ESMAILIZADEH, A., HIRIMUTHUGODA, N.Y., ASHARI, H., SULADARI, S., ZEIN, M.S.A., KUSZA, S., SOHRABI, S., KHARRATI-KOOPAEE, H., SHEN, Q.-K., ZENG, L., YANG, M.-M., WU, Y.-J., YANG, X.-Y., LU, X.-M., JIA, X.-Z., NIE, Q.-H., LAMONT, S.J., LASAGNA, E., CECCOBELLI, S., GUNWARDANA, H.G.T.N., SENASIGE, T.M., FENG, S.-H., SI, J.-F., ZHANG, H., JIN, J.-Q., LI, M.-L., LIU, Y.-H., CHEN, H.-M., MA, C., DAI, S.-S., BHUIYAN, A.K.F.H., KHAN, M.S., SILVA, G.L.L.P., LE, T.-T., MWAI, O.A., IBRAHIM, M.N.M., SUPPLE, M., SHAPIRO, B., HANOTTE, O., ZHANG, G., LARSON, G., HAN, J.-L., WU, D.-D. & ZHANG, Y.-P., 2020. 863 genomes reveal the origin and domestication of chicken. Dans: Bandiera_abtest: a Cg_type: Nature Research Journals number: 8 Primary_atype: Research publisher: Nature Publishing Group Subject_term: Comparative genomics;Structural variation Subject_term_id: comparative-genomics;structural-variation, *Cell Research*, Vol. 30, n° 8, pp. 693-701.
- WEI, X., SHAO, M., GALE, W. & LI, L., 2014. Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land. *Scientific Reports*. Vol. 4, n° 1, pp. 4062-4067.
- WEN, C., YAN, W., ZHENG, J., JI, C., ZHANG, D., SUN, C. & YANG, N., 2018. Feed efficiency measures and their relationships with production and meat quality traits in slower growing broilers. *Poultry Science*, Vol. 97, n° 7, pp. 2356-2364.
- WESTHOEK, H., LESSCHEN, J.P., ROOD, T., WAGNER, S., DE MARCO, A., MURPHY-BOKERN, D., LEIP, A., VAN GRINSVEN, H., SUTTON, M.A. & OENEMA, O., 2014. Food choices, health and environment: Effects of cutting Europe's meat and dairy intake. *Global Environmental Change*, Vol. 26, pp. 196-205.
- WILFART, A., ESPAGNOL, S., DAUGUET, S., TAILLEUR, A., GAC, A. & GARCIA-LAUNAY, F., 2016. ECOALIM: A Dataset of Environmental Impacts of Feed Ingredients Used in French Animal Production. *PLOS ONE*, Vol. 11, n° 12, e0167343.
- WILLEMSEN, H., EVERAERT, N., WITTERS, A., DE SMIT, L., DEBONNE, M., VERSCHUERE, F., GARAIN, P., BERCKMANS, D., DECUYPERE, E. & BRUGGEMAN, V., 2008. Critical assessment of chick quality measurements as an indicator of posthatch performance. *Poultry Science*, Vol. 87, n° 11, pp. 2358-2366.

- WILSON, S., 1969. Genetic Aspects of Feed Efficiency in Broilers. *Poultry Science*, Vol. 48, n° 2, pp. 487-495.
- WOYENGO, T.A., KIARIE, E. & NYACHOTI, C.M., 2011. Growth performance, organ weights, and blood parameters of broilers fed diets containing expeller-extracted canola meal. *Poultry Science*, Vol. 90, n° 11, pp. 2520-2527.
- XIN, H., BERRY, I.L., BARTON, T.L. & TABLER, G.T., 1993. Feeding and Drinking Patterns of Broilers Subjected to Different Feeding and Lighting Programs¹. *Journal of Applied Poultry Research*, Vol. 2, n° 4, pp. 365-372.
- XU, F.Z., ZENG, X.G. & DING, X.L., 2012. Effects of Replacing Soybean Meal with Fermented Rapeseed Meal on Performance, Serum Biochemical Variables and Intestinal Morphology of Broilers. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, Vol. 25, n° 12, pp. 1734-1741.
- YAN, W., SUN, C., WEN, C., JI, C., ZHANG, D. & YANG, N., 2019. Relationships between feeding behaviors and performance traits in slow-growing yellow broilers. *Poultry Science*, Vol. 98, n° 2, pp. 548-555.
- YI, Z., LI, X., LUO, W., XU, Z., JI, C., ZHANG, Y., NIE, Q., ZHANG, D. & ZHANG, X., 2018. Feed conversion ratio, residual feed intake and cholecystokinin type A receptor gene polymorphisms are associated with feed intake and average daily gain in a Chinese local chicken population. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, Vol. 9, n° 1, pp. 50-58.
- YO, T., VILARIÑO, M., FAURE, J.M. & PICARD, M., 1997. Feed Pecking in Young Chickens: New Techniques of Evaluation. *Physiology & Behavior*, Vol. 61, n° 6, pp. 803-810.
- YOUVALARI, S.A., FARHOOMAND, P., KANANI, P.B. & GHASEMABAD, B.H., 2017. Effects of Copper Sulfate and Arginine Supplements on Performance and Carcass Traits in Broiler Chickens Fed with Canola Meal Based Diet. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, Vol. 7, n° 4, pp. 647-654.
- ZACHARIAS, B., BENZ, S., SCHRADE, H. & ZACHARIAS, T., 2016. The performance of growing pigs fed with soybeans, peas and rapeseed meal grown in Central Europe. *Züchtungskunde*, Vol. 88, n° 3, pp. 189-198.
- ZAJAC, M., KICZOROWSKA, B., SAMOLINSKA, W. & KLEBANIUK, R., 2020. Inclusion of Camelina, Flax, and Sunflower Seeds in the Diets for Broiler Chickens: Apparent Digestibility of Nutrients, Growth Performance, Health Status, and Carcass and Meat Quality Traits. *Animals*, Vol. 10, n° 2, pp. 321-337.
- ZATARI, I. & SELL, J., 1990. Effects of Pelleting Diets Containing Sunflower Meal on the Performance of Broiler-Chickens. *Animal Feed Science and Technology*, Vol. 30, n° 1-2, pp. 121-129.

- ZEB, A., SATTAR, A., SHAH, A.B., BIBI, N. & MEULEN, U., 2002. Effects of feeding increased levels of heat processed rapeseed meal on performance of broiler chicks. *Archiv fur Geflugelkunde*, Vol. 66, pp. 158-163.
- ZELTNER, E. et HIRT, H., 2008. A note on fear reaction of three different genetic strains of laying hens to a simulated hawk attack in the hen run of a free-range system. *Applied Animal Behaviour Science - APPL ANIM BEHAV SCI.* Vol. 113, pp. 69-73.
- ZHANG, X., TSURUTA, S., ANDONOV, S., LOURENCO, D.A.L., SAPP, R.L., WANG, C. & MISZTAL, I., 2018. Relationships among mortality, performance, and disorder traits in broiler chickens: a genetic and genomic approach. *Poultry Science*, Vol. 97, n° 5, pp. 1511-1518.
- ZHANG, Y., SHAN, A., JIANG, W., BI, C. & LI, Z., 2013. The effect of vitamin E on growth performance and meat quality in broilers given diets containing distillers' dried grain with solubles (DDGS). *British Poultry Science*, Vol. 54, n° 1, pp. 138-143.
- ZHAO, X., REN, W., SIEGEL, P.B., LI, J., YIN, H., LIU, Y., WANG, Y., ZHANG, Y., HONAKER, C.F. & ZHU, Q., 2015. Housing systems interacting with sex and genetic line affect broiler growth and carcass traits. *Poultry Science*, Vol. 94, n° 7, pp. 1711-1717.
- ZUIDHOF, M.J., FEDORAK, M.V., OUELLETTE, C.A. & WENGER, I.I., 2017. Precision feeding: Innovative management of broiler breeder feed intake and flock uniformity. *Poultry Science*, Vol. 96, n° 7, pp. 2254-2263.
- ZUIDHOF, M.J., SCHNEIDER, B.L., CARNEY, V.L., KORVER, D.R. & ROBINSON, F.E., 2014. Growth, efficiency, and yield of commercial broilers from 1957, 1978, and 2005. *Poultry Science*, Vol. 93, n° 12, pp. 2970-2982.

Annexes

Annexe 1 : Liste des publications


Publications

- 2022** **BERGER, Q.**, GUETTIER, E., BOUVAREL, I., MÉDA, B., BERNARD, J., GANIER, P., CHAHNAMIAN, M., LE BIHAN-DUVAL, E. & MIGNON-GRASTEAU, S., Comparison of different strategies of selection of feed efficiency in broilers. *Journal of Animal Science* (en préparation)
- 2022** **BERGER, Q.**, GUETTIER, E., BERNARD, J., GANIER, P., CHAHNAMIAN, M., LE BIHAN-DUVAL, E. & MIGNON-GRASTEAU, S. Profiles of genetic parameters of body weight and feed efficiency in two divergent broiler lines for meat ultimate pH. *BMC Genomic Data* (en révision)
- 2021** **BERGER, Q.**, GUETTIER, E., URVOIX, S., BERNARD, J., GANIER, P., CHAHNAMIAN, M., LE BIHAN-DUVAL, E. & MIGNON-GRASTEAU, S., 2021. The kinetics of growth, feed intake, and feed efficiency reveal a good capacity of adaptation of slow and rapid growing broilers to alternative diets. *Poultry Science*. 2021. vol. 100, no. 4, pp. 101010-101023.
- 2021** GUETTIER, E., URVOIX, S., SERVANT, P., MIKA, A., **BERGER, Q.** & MIGNON-GRASTEAU, S., 2021. BIRD-e : individualiser la mesure de la consommation d'aliments par les volailles. *Revue des sciences et techniques de l'animal de laboratoire*, vol 49, pp 21-26
- 2021** MIKA, A., GUETTIER, E., **BERGER, Q.**, BIHAN-DUVAL, E.L., BERNARD, J., PAMPOUILLE, E., BOUVAREL, I. & MIGNON-GRASTEAU, S., 2021. Eva-HD - Mise au point d'un automate de consommation alimentaire pour volailles « BIRD-e : Bird Individual Ration Dispenser-electronic ». *Innovations Agronomiques*. 2021. vol. 82, pp. 137.
- 2020** GUETTIER, E., URVOIX, S., SERVANT, P., MIKA, A., **BERGER, Q.** & MIGNON-GRASTEAU, S., 2020. Mise au point d'un automate de consommation alimentaire pour volailles nommé BIRD-e: Bird Individual Ration Dispenser-electronic. *Cahier des Techniques de l'INRA*. 2020. vol. 99, pp. 12 p.

Communications

- 2022** **BERGER, Q.**, GUETTIER, E., URVOIX, S., LE BIHAN-DUVAL, E. & MIGNON-GRASTEAU, S., 2022. Adaptation of slow- and rapid-growing broilers to alternative diets. *World Poultry Congress*. 07-11 aout 2022. Paris, France;
- 2022** MIGNON-GRASTEAU, S., **BERGER, Q.**, GUETTIER, E. & LE BIHAN-DUVAL, E., 2022. Using high throughput phenotyping of growth and feed intake to improve adaptation of chickens to sustainable diets. *7th Summit of Mediterranean Poultry Production* 8-10 juin 2022, Córdoba, Espagne
- 2021** MIGNON-GRASTEAU, S., **BERGER, Q.**, GUETTIER, E. & LE BIHAN-DUVAL, E., 2021. New advances based on our feed station and its use for feed efficiency phenotyping. *72th Eur Assoc Anim Prod*. 2021. Davos.
- 2020** **BERGER, Q.** & MIGNON-GRASTEAU, S. Bird-e : Développement d'un automate de pesée et mesure de consommation en conditions d'élevage. *3èmes Journées Techniques SYSAAF*. 2020, 8-9 Décembre 2020.
- 2020** PAMPOUILLE, E., MIKA, A., BERNARD, J., GUETTIER, E., **BERGER, Q.**, BOUVAREL, I. & MIGNON-GRASTEAU, S. BIRD-e - The Poultry E-Feeding System: Basis and Applications. *2020 Animal Nutrition Conference of Canada*. 2020. 26-28 mai 2020.
- 2019** **BERGER, Q.**, GUETTIER, E., URVOIX, S., DUVAL, E. & MIGNON-GRASTEAU, S. Using high throughput phenotyping of growth and feed intake to improve adaptation of chickens to sustainable diets. *XIth EUROPEAN SYMPOSIUM ON POULTRY GENETICS*. 2019, 23-25 octobre 2019, Prague.

Annexe 2 : Poster présenté au Congrès ESPG (Prague) du 23 au 25 octobre 2019



Using high throughput phenotyping of body weight and feed intake to improve adaptation of chickens to sustainable diets

BERGER Quentin, GUETTIER Elodie, URVOIX Séverine, LE BIHAN-DUVAL Elisabeth, MIGNON-GRASTEAU Sandrine

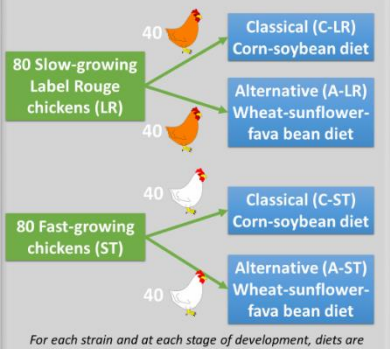
BOA, INRA, UNIVERSITE DE TOURS, 37380 NOUZILLY, FRANCE

Context

Diversification of feedstuffs used in poultry diets implies that animals have to be able to adapt to alternative diets, in order to maintain their feed efficiency and growth when fed with various diets. We thus compared slow and rapid-growing broilers fed with a corn-soybean diet or with an alternative diet including more sustainable feedstuffs. Adaptation to the diets was assessed through a continuous and individual phenotyping of body weight and feed intake on floor-reared animals, thanks to an electronic feed station.


Materials and methods

Experimental design



For each strain and at each stage of development, diets are isoproteic and isoenergetic

Deep large scale phenotyping



Feed station:

Continuous measurement of individual feed intake and body weight

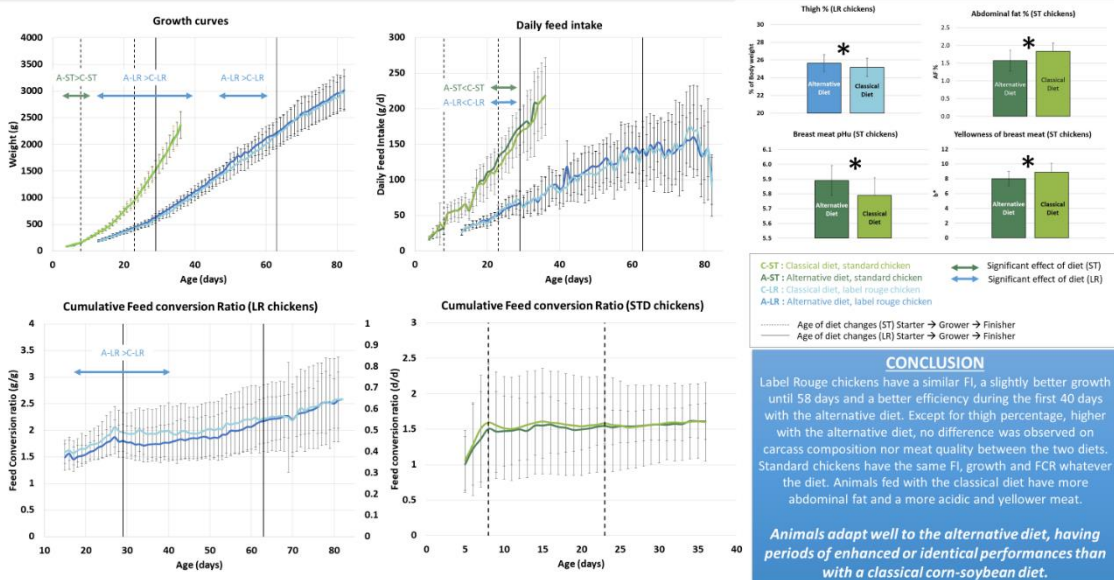
Feed efficiency

Growth

Carcass composition & meat quality

Breast%, Abdominal fat %
Breast meat colour (L, a*, b*)
Breast meat pHu

Results





UMR BOA
Centre INRA Val de Loire
37380 Nouzilly
www.val-de-loire.inra.fr



The French branch of WPSA is gratefully acknowledged for its support to the participation of Quentin Berger to the ESPG congress



This study was supported by Feed-a-Gene, a project that has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No. 633531



Annexe 3 : Article de Guettier et al. sur les caractéristiques techniques de la mangeoire BIRD-e



Mise au point d'un automate de consommation alimentaire pour volailles nommé BIRD-e: Bird Individual Ration Dispenser-electronic

Elodie Guettier, Séverine Urvoix, Philippe Servant, Amandine Mika, Quentin Berger, Sandrine Mignon-Grasteau

► **To cite this version:**

Elodie Guettier, Séverine Urvoix, Philippe Servant, Amandine Mika, Quentin Berger, et al.. Mise au point d'un automate de consommation alimentaire pour volailles nommé BIRD-e: Bird Individual Ration Dispenser-electronic. Cahier des Techniques de l'INRA, INRA, 2020, 99, 12 p. hal-02627687

HAL Id: hal-02627687

<https://hal.inrae.fr/hal-02627687>

Submitted on 26 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Mise au point d'un automate de consommation alimentaire pour volailles nommé BIRD-e : Bird Individual Ration Dispenser-electronic

Elodie Guettier^{1*}, Séverine Urvoix^{1*}, Philippe Servant², Amandine Mika³, Quentin

Berger¹, Sandrine Mignon-Grasteau¹

1 INRAE, Université de Tours, BOA, 37380 Nouzilly, France ;
severine.urvoix@inrae.fr

et elodie.guettier@inrae.fr

2 INRAE, PEAT, 37380 Nouzilly, France

3 ITAVI, 37380 Nouzilly, France

* Co-premières auteures



Zootechnicienne de formation (Master PA), j'ai débuté ma carrière à l'INRA en tant que Directrice d'unité expérimentale (UE PAO, Centre Val de Loire). A l'issue de 3 mandats, j'ai intégré l'UMR BOA à mi-temps pour y développer une activité de recherche à l'interface Elevage de précision et bien-être animal. Je partage le reste de mon temps de travail entre de l'animation transversale (coordinatrice des SBEA de l'INRAE) et une mission d'expertise sur le dispositif expérimental INRAE en tant que membre de la

CNUE-DISC.



Je suis Séverine Urvoix, technicienne en expérimentation animale dans l'équipe AQSel de l'UMR-BOA. Je suis très sensible aux problématiques liées aux conditions d'élevages et à l'expérimentation animale. J'aime les défis. Après 16 années en tant que zootechnicienne, puis technicienne en histopathologie j'ai été recrutée à l'INRA en

2009 et intégré le groupe de travail de développement d'outils de phénotypage en collaboration avec l'UE-PEAT. En 2012, je me suis lancée dans un nouveau challenge et suis partie en disponibilité sur un projet de protection et de conservation de l'Outarde Houbara aux EAU. A mon retour dans l'équipe AQSel en 2015 le projet mangeoire instruit depuis quelques années a été relancé et naturellement je me suis à nouveau impliquée dans cette aventure.

Résumé. L'UMR-Biologie des Oiseaux et Aviculture et l'UE-PEAT du centre Val de Loire ont travaillé sur le développement et la conception d'une mangeoire électronique pour les poulets élevés au sol. Cet outil innovant pour l'espèce permet des mesures précises et continues de l'alimentation et du poids des animaux. Cette avancée permet d'entrevoir de nouvelles perspectives dans la recherche et le développement de l'élevage avicole de précision. Cela permettra par exemple d'affiner la sélection des animaux sur l'efficacité alimentaire ou de mettre au point de nouvelles formulations d'aliments. De plus, en se libérant de la contrainte de la mesure en cage, cet outil permet des mesures respectueuses du bien-être animal.

Mots-clés. consommation alimentaire, pesage, volaille, haut-débit, comportement, bien-être

Abstract. The unit UMR-Biologie des Oiseaux and Aviculture (Poultry) and the unit PEAT from Val de Loire center have worked together to develop and design an electronic feeding dish for chicken on the ground. This innovative device allows exact and continuous weighings of the feeding and weigh of the animals. This breakthrough allows thinking about new perspectives in the research and developing of accurate poultry sector.

This will allow for example to improve animal selection on the feed efficiency or to set out new feed formulas. Moreover, this device allows well-being measuring of animals.

Keywords. feed consumption, weighing, poultry, high output, behaviour, well-being

Introduction

La maîtrise des coûts de production et le bien-être des animaux sont des facteurs importants pour les éleveurs d'animaux de rente. Aujourd'hui, l'alimentation représente environ 70 % du coût de production de la viande de poulet. L'indice de consommation (IC), qui est le ratio de la consommation alimentaire sur la production de viande ou d'œufs, est le principal critère de rentabilité de ces élevages. C'est aussi un indicateur de l'impact environnemental de la production. Par exemple, une réduction de 10 % de l'IC permet une réduction du coût de production du poulet vif d'environ 6 %, mais aussi une réduction de l'impact environnemental de 12 % pour l'excrétion d'azote et de 17 % pour le phosphore (De Verdal et al., 2011).

Jusqu'à récemment, on ne pouvait mesurer la consommation alimentaire des animaux qu'en les isolant en cages individuelles. Cela est néfaste au bien-être des animaux car cela empêche

l'expression normale des comportements alimentaires, sociaux et de l'activité physique des animaux, ce qui biaise les résultats. Le biais est particulièrement important dans le cas des productions alternatives de type poulets labels ou biologiques. De plus, cette méthode d'hébergement dessert le bien-être animal. L'alternative consistait en une mesure au sol dans les conditions de production, mais seulement au niveau du groupe. Or, les données individuelles sont nécessaires aux généticiens pour la sélection. De plus, pour les nutritionnistes, la mise au point de nouveaux aliments grâce à des mesures au niveau des groupes implique l'utilisation d'un nombre élevé d'animaux. Des outils pour bovins, porcins ou canards existaient, mais il manquait encore un outil fiable et accessible pour les poulets.

A partir de 2005, un groupe de travail a donc été constitué avec des chercheurs, des ingénieurs et des techniciens pour réfléchir au développement d'un outil permettant de mesurer la consommation alimentaire individuelle de Gallus élevés en groupe et au sol.

Depuis, l'équipe AQSel travaille avec l'UE-PEAT sur le développement d'un outil qui permet l'enregistrement de données individuelles de consommation, comportement alimentaire et poids de volailles élevées en groupe. Grâce à un système d'émetteur (puce RFID) fixé à l'animal et de récepteur (antenne) placés sur la mangeoire, nous pouvons enregistrer les données dès la phase de démarrage sans biaiser le comportement des animaux.

En 2012, un brevet d'invention a été déposé pour le caractère innovant de l'outil.

Depuis, grâce à différentes expérimentations, nous avons considérablement amélioré la partie électronique, l'enregistrement et le traitement des données ainsi que l'ergonomie et les matériaux utilisés. Nous nous sommes attachés à des améliorations techniques comme par exemple : le revêtement antidérapant et les bords antiperchage des plateaux de pesée des aliments ou les capots placés au-dessus des accès à l'aliment.

Des essais ont permis de comparer les comportements et les performances animaux élevés au sol et en groupe sur différents génotypes ou différents régimes alimentaires. Les résultats très encourageants ont confirmé l'accomplissement d'années de travail et de réflexion sur l'automate et nous permettent de vous le présenter.

Cet article décrit le processus de développement de la conception jusqu'à la validation avec une description détaillée de l'automate et de son fonctionnement.

Les étapes clés de développement pour un dispositif adapté

Pour réaliser l'automate de consommation pour volailles, plusieurs étapes ont été nécessaires, reprises dans la figure ci-dessous.

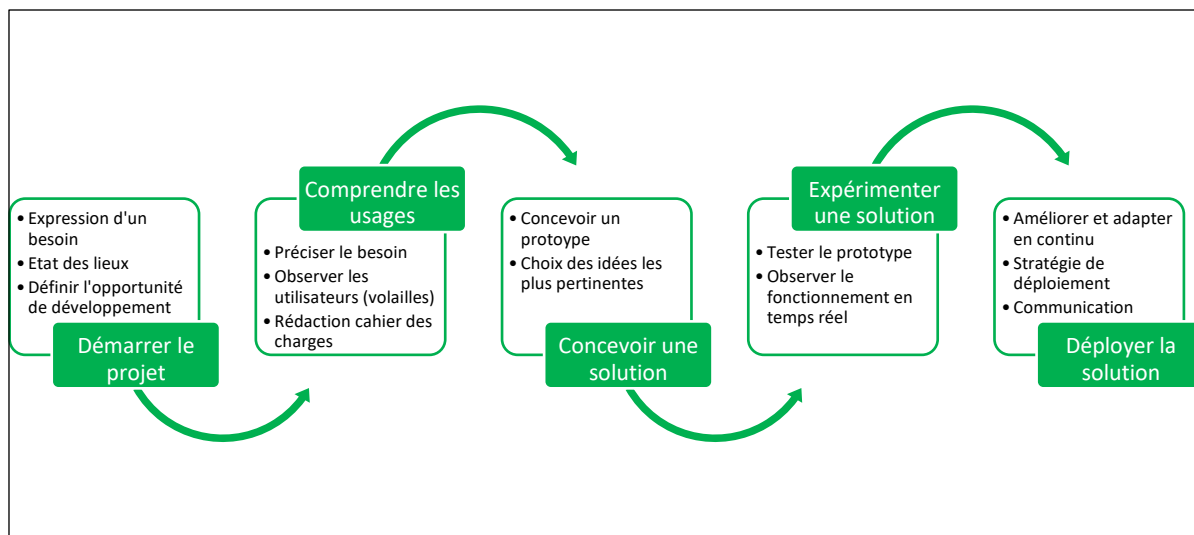


Figure 1. Processus de mise au point de l'outil

La contrainte que représentait la mesure de la consommation alimentaire individuelle en cage a permis d'exprimer la nécessité d'expérimenter dans des conditions d'élevage réelles, c'est-à-dire avec des animaux en groupe et au sol. Une fois le besoin exprimé, un premier état des lieux a été réalisé pour recenser l'ensemble des dispositifs existants sur le marché. N'ayant pas identifié d'équipement répondant à notre objectif, nous avons considéré qu'il était opportun de développer notre propre projet.

Pour rédiger un cahier des charges qui réponde précisément au besoin, il est important de bien comprendre les usages. Dans un premier temps, nous avons identifié les différents utilisateurs de l'outil :

- les volailles utilisent l'automate de consommation pour s'alimenter ;
- l'expérimentateur l'utilise comme distributeur d'aliment et comme substitut aux pesées manuelles des animaux ;
- le scientifique l'utilise comme un outil de phénotypage permettant d'obtenir des mesures individuelles et en continu de poids d'animal et de poids d'aliment consommé.

La description et l'analyse de ces différents besoins a permis de concevoir un premier prototype conçu et fabriqué en interne dans l'atelier de l'unité PEAT. Ce premier prototype a fait l'objet d'un brevet d'invention (n°1255242) détaillant essentiellement le concept.

Celui-ci a été testé à de nombreuses reprises, puis amélioré, permettant de concevoir un second prototype, plus performant, répondant à une grande partie des besoins exprimés. Les premiers essais mis en place avaient pour principal objectif de tester si les animaux acceptent de manger avec cette mangeoire, sans modifier leur comportement et sans que leur croissance soit affectée.

Une seconde étape fondamentale a été le choix du couple émetteur/récepteur RFID. En collaboration avec plusieurs collègues travaillant déjà sur cette technologie dans d'autres espèces animales, nous avons recensé les équipements existants et testé ceux qui semblaient les plus adaptés à la volaille en position externe avec une sensibilité intéressante. Trois protocoles ont été nécessaires pour valider la partie « identification électronique ». Un total de 15 expériences ont permis de tester les idées les plus pertinentes et améliorer l'automate.

Cette 2^e version nous a servi de base pour développer ensuite le modèle pré-industriel.

Pour des raisons d'ergonomie, de sécurité du personnel mais également dans un objectif de déploiement de l'automate, nous sommes passés à l'étape de pré-industrialisation. Chaque pièce de l'automate a été individualisée et dessinée en trois dimensions avec ses cotes précises de manière à assurer la reproductibilité de l'ensemble. Il a été fait de même pour la partie électrique regroupée dans un boîtier sécurisé, ventilé et climatisé. Cette étape a permis la construction de plusieurs unités identiques en tous points.

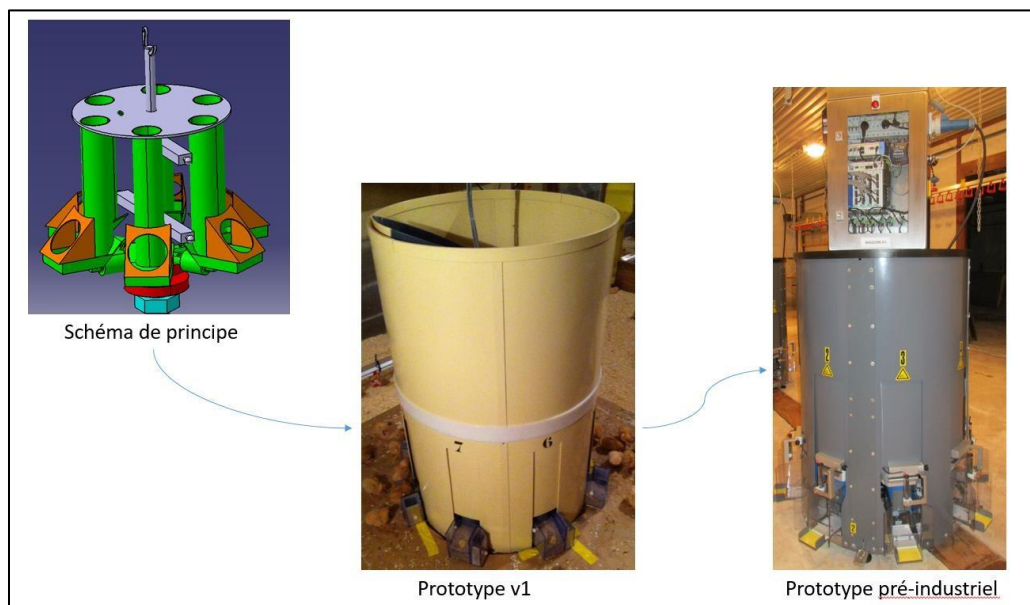


Figure 2 Photos des prototypes

Description de l'automate

Caractéristiques générales

La mangeoire automatique développée par INRAE (UMR BOA et UE PEAT) en collaboration avec nos partenaires de la filière (ITAVI et SYSAAF) permet l'enregistrement automatique de données individuelles de consommation, de comportement alimentaire et de poids des poulets. Cet automate

permet d'obtenir des mesures précises et continues dans les conditions de production des animaux élevés au sol et en groupe.

S'inspirant des mangeoires existantes en élevage et du comportement naturel des volailles, nous avons fait le choix de le concevoir avec une forme circulaire. L'équipement est composé d'un socle en inox du diamètre de la mangeoire qui accueille l'ensemble de l'automate. Ses pieds réglables permettent la mise de niveau et la stabilité. Une coque extérieure cylindrique en PVC protège les éléments internes. L'ensemble intérieur est mobile verticalement grâce à une colonne électrique fixée sur le socle, afin d'adapter la hauteur de la mangeoire à la taille des animaux. Les plaques de support des pesons pour la pesée de l'animal sont également fixées sur ce socle. Sur la partie supérieure de la colonne électrique, nous avons fixé les plaques de support pour les pesons de la pesée de l'aliment.

La distribution des aliments est assurée par huit colonnes indépendantes (1 colonne pour chaque accès). Chaque colonne possède son propre peson. La capacité de mesure des pesons pour l'aliment est de 10 Kg. Chaque colonne a un volume de stockage de 5,6 dm³ et permet de remplir environ 3 Kg d'aliment. Chaque colonne peut être remplie avec un aliment différent.

La partie basse des colonnes d'aliment est l'accès à l'alimentation pour les animaux. Pour faciliter le lavage et la désinfection de cette partie largement soumise aux salissures, nous avons désolidarisé la partie basse du haut de la colonne. Une trappe de fermeture manuelle permet d'isoler la colonne en cas de dépose de la partie basse de la mangeoire. Pour éviter le gaspillage, l'accès à l'aliment est couvert d'un capot transparent au travers duquel l'animal passe la tête pour manger.

La pesée des animaux est effectuée par l'intermédiaire de plateaux interchangeables selon la croissance des animaux : ils sont clipsés sur le peson animal dans l'axe des huit accès. Chaque plateau possède son propre peson. La capacité de mesure des pesons pour l'animal est de 30 Kg.

Les antennes RFID sont positionnées dans un tube éprouvette et tenues par une pièce fixée sur le carter intérieur. Elles sont ajustables en hauteur en faisant glisser le tube éprouvette dans le clip support, et en position axiale par l'intermédiaire du support coulissant et de son bouton moleté. Ce système permet de positionner l'antenne au plus près de la puce de l'animal (quand l'animal est dans ses premiers jours de vie, l'antenne est plus basse, près de l'accès à l'aliment). Pour que la puce soit bien détectée, la distance puce-antenne doit être comprise entre 1 et 3 cm.



Figure3. Automate de consommation BIRD

Descriptif technique

Les plateaux de pesée

Le dispositif comprend 4 jeux de plateaux de pesée pour animaux changeables en fonction de la croissance de l'animal. Le changement de plateau peut se faire à n'importe quelle position en hauteur des mangeoires.

Les capots de mangeoire (anti-gaspillage)

Au niveau de chaque accès, se trouvent des capots anti-gaspillage qui évitent que l'animal éparpille de l'aliment tout autour et biaise la mesure de consommation. Trois jeux de capots ont été réalisés pour s'adapter à la croissance de l'animal.

Hauteur des mangeoires adaptable

Le système de consommation est conçu pour que la hauteur des mangeoires s'adapte à la taille des animaux. Grâce à la colonne centrale, il est possible de monter et descendre les accès. Une télécommande est située sur le pupitre avec un bouton HAUT et un bouton BAS. La course s'arrête quand les butées sont atteintes.

Trappe de fermeture aliment

Chaque colonne d'aliment est équipée d'une trappe de fermeture manuelle, permettant de bloquer la descente de l'aliment jusqu'aux blocs mangeoires et ainsi enlever la partie basse pour le nettoyage.

Lorsque la trappe est poussée au maximum, la colonne est ouverte et quand la trappe est tirée au maximum (butée interne), la colonne d'aliment est fermée.

Réglage de débit de l'aliment

Le débit de descente de l'aliment dans les blocs mangeoires inférieurs est réglable manuellement grâce à une petite vis de réglage.

Antenne électronique

Au-dessus de chaque accès, une antenne RFID est positionnée dans une éprouvette, elle-même fixée sur une pièce mécanique permettant d'approcher l'antenne au plus près de la puce de chaque animal.

L'armoire électrique

Positionnée sur la partie supérieure de la colonne centrale, l'armoire électrique regroupe l'ensemble du matériel électrique et électronique (cartes électroniques réceptionnant le signal des antennes, système d'acquisition des données de poids aliment et animal, ordinateur qui compile l'ensemble de ces données).

Fonctionnement de l'automate

Détection des animaux

Chaque animal est identifié à l'aide d'une puce électronique encapsulée dans une gaine rétractable. La puce gainée est ensuite fixée en externe à la base du cou de l'animal à l'aide d'un fil de nylon type attache étiquette textile passé en sous-cutané.

Lorsque l'animal vient manger à un accès, il grimpe sur le plateau animal et la puce qu'il porte au cou est identifiée par l'antenne électronique fixée juste au-dessus. Chaque antenne est reliée à une carte électronique qui transmet l'ensemble des données d'identification à un système d'acquisition des données (PMX), puis stockées dans un ordinateur industriel. L'ensemble du matériel informatique et électronique est regroupé dans l'armoire électrique positionnée au-dessus de l'automate. L'armoire est climatisée pour maintenir les équipements électroniques à une température correcte.

Les données collectées

Les données élémentaires

Trois types de données élémentaires ont été collectés.

✚ Les données d'identification de l'animal

A chaque passage d'un animal qui vient manger en grimpant sur le plateau, la puce électronique est détectée par l'antenne. Les données d'identification sont enregistrées dans un premier fichier avec les éléments suivants :

« Date – Heure – Numéro de la mangeoire - Numéro d'accès – Numéro d'identification ».

✚ Les données de poids animal

Pour atteindre l'accès, l'animal doit monter sur un plateau fixé sur un peson, qui enregistre le poids de l'animal à chaque seconde. Le fichier de données contient, pour chaque visite de l'animal à la mangeoire, « Date – Numéro de la mangeoire – Numéro d'accès - Heure de début de la visite – Heure de fin de la visite – Poids moyen de l'animal pendant la visite ».

✚ Les données de poids aliment

Le poids de l'aliment dans chacune des colonnes d'aliment de la mangeoire est enregistré en temps réel, seconde par seconde, qu'un l'animal soit présent ou non, grâce aux pesons fixés sur chaque colonne d'aliment. On obtient donc un fichier contenant une donnée par seconde et par accès, qui contient : « Date – Heure – Numéro de la mangeoire - Numéro d'accès – Poids aliment ».

Le système d'acquisition de données synchronise les données en provenance des huit accès et les transmet ensuite à l'ordinateur central qui les stocke, puis les exporte vers un serveur.

Les données prétraitées

Les données élémentaires du poids de la mangeoire, seconde par seconde, ont été utilisées pour la mise au point de l'algorithme de calcul de la consommation pour chaque visite en déterminant l'heure de début et de fin du repas, le poids de l'accès au début et à la fin de la visite.

Fluctuation aléatoire du poids de l'aliment Fluctuation du poids de l'aliment due à la présence d'un animal

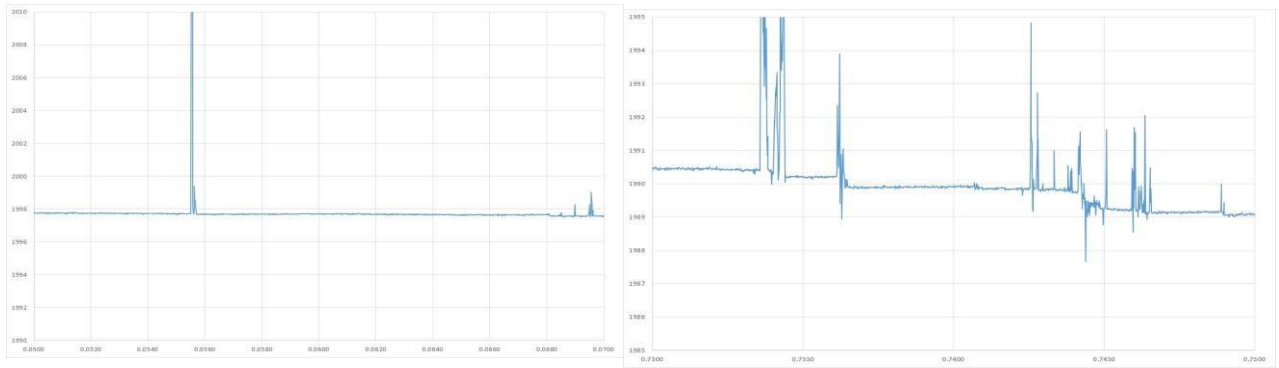


Figure 4. Fluctuations du poids d'aliment aléatoires et liées à la présence d'un animal

Des représentations graphiques du poids d'aliment en fonction du temps ont été utilisées, à différents moments de la journée, pour distinguer les fluctuations aléatoires du poids d'aliment de celles qui correspondent réellement à une visite. La figure 4 montre un exemple de fluctuation aléatoire pendant la nuit alors qu'aucun animal n'est en train de manger et un exemple de fluctuation observée quand des animaux mangent réellement. Ces graphiques ont également permis de déterminer les règles de correction des durées des repas ainsi que celles à utiliser pour le calcul du poids moyen de l'aliment avant et après un repas.

Validation du système

Vérification de la fiabilité du système d'identification

Méthode

Pour s'assurer de la fiabilité des données, une étape d'identification visuelle des animaux a été réalisée pour s'assurer que les données d'identification enregistrées par l'automate correspondaient bien au passage de l'animal dit.

Pour cela, les animaux ont été équipés de ponchos réalisés sur mesure en fonction de la taille de l'animal, comme montré sur la figure 5. Ces ponchos ont été fabriqués dans du tissu polyester.



Figure 5. Poncho permettant l'identification des animaux sur les enregistrements vidéos

Au-dessus des accès à l'aliment, nous avons fixé des caméras vidéos qui filment en continu le comportement des animaux de façon à voir sans ambiguïté leurs déplacements autour des plateaux de pesée permettant d'accéder à l'aliment. Tous les passages des animaux à l'automate ont été répertoriés. Pour chaque enregistrement, nous avons créé des fichiers Excel en reportant le numéro de la caméra, la date, les heures de début et de fin de chaque visite, le numéro de l'accès à la mangeoire, l'animal observé, sa position sur le plateau (bien positionné, complètement à côté du plateau ou dans une position intermédiaire). La présence d'autres animaux à proximité ou sur le plateau de pesée des animaux a également été notée.

Ces informations ont ensuite été comparées à celles enregistrées automatiquement par la mangeoire. Elles ont permis de définir la sensibilité de l'antenne afin de savoir à quelle distance l'antenne détecte la puce.

Ces observations ont permis de faire évoluer l'ergonomie de la mangeoire afin de répondre à nos attentes. Par exemple : ajuster la forme des plateaux de pesée des animaux pour limiter le nombre de données de poids à éliminer lorsque l'animal ne pose qu'une patte sur le plateau. Des ailettes ont également été ajoutées sur les côtés des accès à l'aliment pour ne permettre l'accès qu'à un seul animal à la fois.

Confirmation sur une période courte

Nous avons réalisé le dépouillement des vidéos sur une période de sept jours et focalisé nos observations sur quatre animaux.

La vérification s'est faite comme suit :

- si une consommation est détectée dans la vidéo et pas par les données de l'automate mais a été confirmée par les données brutes de lecture des puces électroniques : le repas est confirmé.

- si une consommation est détectée dans la vidéo mais n'est détectée ni dans les données prétraitées de la mangeoire ni dans les données élémentaires de lecture des puces : le repas est considéré comme manqué.

Les résultats nous ont permis de valider le système car les visites des animaux à la mangeoire ont été détectées dans 94,7 % des cas. La moitié des visites manquées a une durée inférieure à cinq secondes.

On observe également très fréquemment une différence de fréquentation des accès : ceux étant les plus proches de la ligne d'abreuvement sont les plus utilisés.

Calcul de la consommation alimentaire

Méthode

Différents cas de figures pour le calcul de la consommation sont observés:

Dans le cas idéal, l'animal est détecté dès son arrivée et la lecture de la puce électronique est perdue dès le départ de l'animal. De même, le poids de l'aliment est détecté dans les dix secondes avant l'arrivée de l'animal et dans les dix secondes après son départ est stable. Pour calculer la consommation, on fait la différence entre le poids moyen d'aliment dans la colonne entre la fin du repas précédent et le début du repas étudié d'une part et entre la fin du repas étudié et le début du repas suivant d'autre part. Les fluctuations aléatoires du poids d'aliment sur ces périodes sont éliminées grâce au calcul de la distance de Cook, indicateur de l'impact d'une valeur sur la moyenne. Les données dont la distance de Cook (et donc l'influence sur la moyenne) sont fortes sont éliminées.

La consommation au cours du repas illustré dans la figure 6 est de 0,57 g.

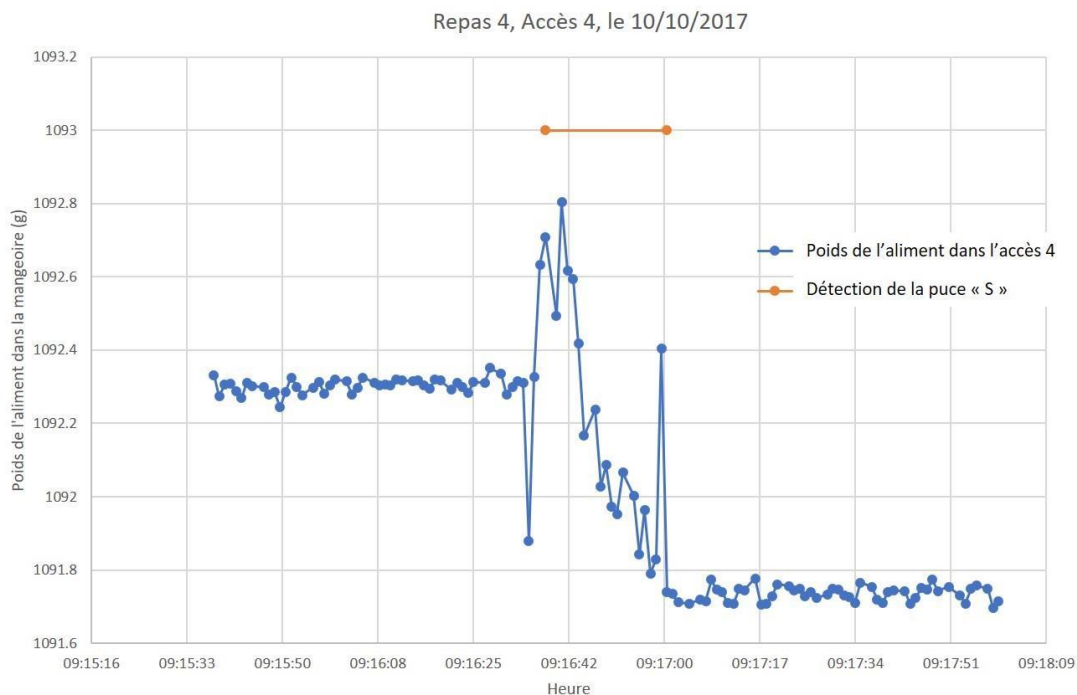


Figure 6. Exemple de repas avec concordance complète entre la présence de l'animal et sa détection par la puce électronique

Il existe d'autres cas de figures, par exemple :

- la puce électronique de l'animal n'est détectée que sur une partie du repas : soit l'animal est mal détecté à son arrivée ou perdu avant son départ. Le calcul de la distance de Cook permet d'éliminer les données de poids d'aliment collectées pendant le repas mais qui sont à tort considérées comme en dehors du repas.
- lorsque deux animaux se succèdent sur un même accès dans un délai inférieur à 10 secondes entre les deux animaux, un repas unique pour les deux animaux est calculé et une consommation respective leur est attribuée au prorata du temps passé sur la durée totale du repas unique.

Fiabilité du calcul de la consommation et de la pesée des animaux

La dernière expérimentation (2019) avec l'automate a permis de confirmer que les enregistrements individuels de poids d'animaux étaient comparables aux pesées manuelles.

Le tableau 1 ci-dessous présente les données de moyenne de poids de 80 poulets de type label pendant la période d'élevage de J13 à J82. L'écart plus important observé à J13 est dû à une dérive des pesons qui a été corrigée après la pesée manuelle.

Age (j)	Poids moyen automate (g)	Poids moyen Pesée (g)	Ecart de l'automate avec la pesée réelle
13	193	182	+6.4 %
27	530	517	+2.4 %
41	1125	1091	+3.1 %
55	1811	1756	+3.2 %
69	2514	2421	+3.8 %
82	2986	2980	+0.2 %

Tableau 1. Comparaison des poids obtenus avec la mangeoire et les poids réels

Nous avons fait de même pour comparer les quantités d'aliment distribuées manuellement dans chaque accès à celles enregistrées par l'automate. La figure 7 nous permet d'observer l'évolution des consommations enregistrées et réelles en fonction de l'âge des animaux.

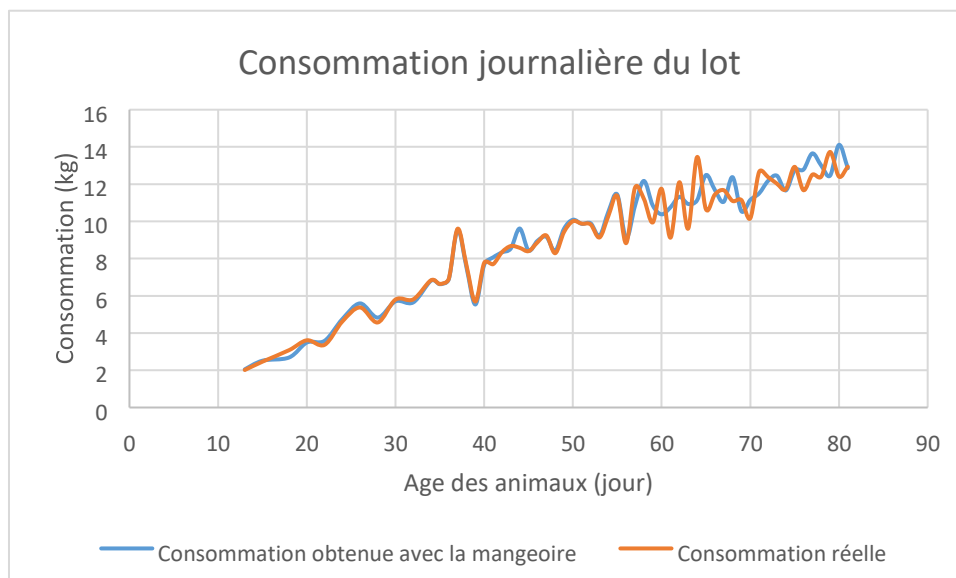


Figure 7. Comparaison des consommations journalières obtenues avec la mangeoire et les consommations réelles

Une différence très faible est observée en début de période d'élevage et s'élève en moyenne à 5 % entre les données obtenues par l'automate et celles calculées à partir des pesées de l'aliment à chaque remplissage de la mangeoire.

Conclusion et Perspectives

L'objectif initial du projet était le développement d'un automate qui permette l'enregistrement de données individuelles de consommation chez des volailles élevées en groupe et au sol. Il a été atteint au terme de huit années de réflexion et de travail collectif.

Le développement et la mise au point d'un tel outil nous rappelle que le processus d'innovation nécessite d'être coordonné pour centraliser les idées, organiser le travail par étapes, mobiliser les compétences et communiquer avec les différents partenaires. Un projet de ce type nécessite également des moyens financiers conséquents, parfois difficiles à mobiliser dans la phase amont. Ces deux points ont parfois fait défaut dans ce projet ce qui en a allongé la durée et l'aboutissement. La création d'un consortium avec la présence de l'Institut Technique AVicole, le SYndicat des Sélectionneurs Avicoles et Aquacoles Français, l'implication des départements GA et PHASE de l'INRAE ainsi que des partenaires privés et publics européens a été salvateur pour lever les fonds nécessaires à la réalisation des différentes expérimentations et la mise au point de l'outil.

Un atout important pour la réalisation du projet a également été la proximité géographique et relationnelle avec le personnel de l'atelier qui a entièrement réalisé le premier prototype et les techniciens animaliers de l'Unité expérimentale PEAT qui ont apporté leur expertise pour améliorer l'ergonomie de l'automate.

Nous avons baptisé cet automate « BIRD-e » pour *Bird Individual Ration Dispenser-electronic*, et pu en construire six unités grâce aux financements des départements GA et PHASE, un projet de pré-valorisation et au soutien de l'Équipement Lourd INRAE. Avec un tel dispositif, nous sommes donc aujourd'hui en mesure de réaliser des expérimentations sur volailles, en condition d'élevage réel (au sol et en groupe) et de récolter des mesures individuelles de consommation alimentaire et de pesées de l'animal. Ces données sont enregistrées pendant toute la période d'élevage. Chaque automate est adapté pour 80 à 100 animaux. Avec les six automates, il est donc possible de suivre la consommation et la croissance de 600 animaux individuellement ce qui permet d'augmenter la puissance statistique des tests réalisés. Les données générées à chaque expérimentation sont stockées sur un serveur local INRAE mais il est nécessaire de mener une réflexion collective sur la gestion de ces données à court, moyen et long terme. Ce travail va être réalisé avec les principaux utilisateurs et nos collègues du CATI Sicpa courant 2020.

Pour finir, BIRD-e représente une réelle innovation pour la recherche et offre de nouvelles perspectives autour de la sélection génétique, de l'alimentation des animaux mais aussi du comportement alimentaire. Cet automate permet d'expérimenter sans altérer le comportement et le

bien-être des volailles tout en respectant le principe des 3Rs puisque son utilisation permet de réduire le nombre d'animaux utilisés à des fins scientifiques.

Remerciements

Ces remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont contribué au développement et à la réalisation de cet outil ainsi qu'à celles qui ont soutenus ce projet long et ambitieux.

Un merci particulier à Mmes Nadine SELLIER et Marie CHABAULT qui ont suivi les premières étapes du développement de l'automate, aux techniciens de PEAT tels que Jean-Marie BRIGANT, Serge NEVOIT, Marine CHAHNAMIAN, Patrice GANIER, Olivier CALLUT, Christophe RAT, Christophe THEULEAU et à Jérémy BERNARD (ingénieur développement) qui ont testé et proposé des idées d'amélioration au fil des années, à nos partenaires de l'ITAVI et du SYSAAF.

Cette expérience a été très enrichissante pour tous ses acteurs et a permis un travail collectif et collaboratif.



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

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

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Le Cahier des Techniques de l'Inra », la date de sa publication et son URL).

Bibliographie

De Verdal, H. (2011) Possibilités de réduction des rejets chez le poulet par la sélection génétique (Thèse de doctorat, Université François Rabelais (Tours), FRA

Transfert technologique

- Brevet FR 1255242 déposé le 06 juin 2012
- Licence ou option de licence associée à un programme de R&D

Annexe 4 : Tables supplémentaires de l'article "The kinetics of growth, feed intake and feed efficiency reveal good capacity of adaptation of slow- and rapid-growing broilers to alternative diets"

Supplementary table 4.1. Least square means of daily body weight for alternative (A) and control (C) diets.

Age	Label Rouge chickens			Standard chickens		
	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value
4				82.99	90.12	1.06E-05
5				99.69	108.02	3.72E-06
6				116.09	125.50	8.10E-05
7				137.33	141.07	0.169
8				156.09	160.14	0.174
9				194.86	196.44	0.678
10				231.34	238.89	0.121
11				273.25	277.01	0.520
12				309.42	310.32	0.883
13	194.69	189.28	0.209	353.16	350.29	0.705
14	213.54	204.61	0.042	385.37	384.62	0.928
15	239.33	230.94	0.091	428.43	418.77	0.359
16	261.36	249.26	0.025	470.17	469.72	0.968
17	291.35	275.97	0.007	540.39	529.37	0.362
18	313.95	297.50	0.004	608.28	598.35	0.469
19	340.34	321.59	0.004	688.24	665.82	0.141
20	365.21	348.25	0.015	757.75	739.65	0.271
21	388.92	366.49	0.003	823.58	808.45	0.436
22	415.26	390.38	0.002	892.64	879.19	0.488
23	438.03	419.91	0.056	954.77	952.19	0.915
24	465.89	442.12	0.013	1050.00	1041.94	0.762
25	490.27	468.22	0.026	1155.48	1143.70	0.647
26	522.46	496.54	0.029	1245.47	1241.22	0.884
27	540.77	509.61	0.012	1332.69	1334.00	0.968
28	593.70	557.60	0.007	1450.84	1427.45	0.488
29	628.62	595.81	0.031	1552.73	1523.01	0.417
30	670.05	636.21	0.030	1673.59	1626.82	0.217
31	708.27	675.11	0.037	1781.50	1712.91	0.101
32	758.53	708.13	0.004	1860.04	1818.88	0.364
33	796.65	734.18	0.001	1996.28	1942.93	0.274
34	846.28	784.72	0.001	2097.23	2060.89	0.435
35	883.55	836.65	0.009	2249.33	2182.37	0.175
36	920.83	882.02	0.054	2414.18	2337.04	0.174
37	965.44	929.51	0.071			
38	1018.32	962.84	0.010			
39	1051.39	1006.60	0.051			
40	1102.09	1045.99	0.015			
41	1138.61	1100.49	0.101			

Age	Label Rouge chickens			Standard chickens		
	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value
42	1193.03	1166.79	0.270			
43	1232.71	1199.65	0.180			
44	1296.98	1248.02	0.068			
45	1345.46	1312.04	0.205			
46	1390.20	1363.70	0.379			
47	1446.54	1412.17	0.212			
48	1491.32	1456.91	0.245			
49	1552.49	1488.16	0.031			
50	1643.91	1536.28	0.001			
51	1688.94	1603.92	0.016			
52	1758.72	1643.77	0.003			
53	1768.69	1708.66	0.089			
54	1841.65	1711.61	0.001			
55	1844.30	1767.99	0.057			
56	1907.01	1817.16	0.024			
57	1968.20	1872.12	0.017			
58	2000.18	1895.25	0.012			
59	2029.89	1950.45	0.059			
60	2110.20	2012.05	0.026			
61	2138.80	2048.48	0.041			
62	2143.23	2135.15	0.852			
63	2205.65	2170.73	0.464			
64	2246.03	2234.39	0.811			
65	2312.17	2270.33	0.380			
66	2358.27	2344.40	0.787			
67	2410.70	2386.87	0.651			
68	2447.45	2453.84	0.903			
69	2493.24	2531.72	0.474			
70	2557.95	2539.63	0.736			
71	2584.14	2588.45	0.937			
72	2626.33	2569.01	0.304			
73	2673.22	2656.80	0.778			
74	2712.07	2659.12	0.380			
75	2744.56	2705.07	0.526			
76	2796.93	2754.03	0.490			
77	2801.43	2789.54	0.853			
78	2849.20	2821.18	0.660			
79	2887.96	2887.92	0.999			
80	2953.54	2884.80	0.314			
81	2960.79	2948.35	0.852			
82	2994.66	2961.95	0.640			

Supplementary table 4.2. Least square means of average daily gain for alternative (A) and control (C) diets.

Age	Label Rouge chickens			Standard chickens		
	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value
5				13.44	13.67	0.598
6				14.54	14.30	0.615
7				18.66	17.74	0.099
8				23.45	22.45	0.122
9				26.97	27.69	0.347
10				30.65	30.61	0.959
11				31.81	30.97	0.352
12				30.05	29.79	0.757
13				31.03	29.18	0.072
14				32.00	31.71	0.806
15	18.92	17.54	0.001	36.04	36.44	0.738
16	20.38	18.31	9.63E-07	43.88	42.95	0.472
17	20.73	18.32	3.07E-07	50.91	49.12	0.171
18	20.70	18.46	2.97E-04	56.58	53.33	0.023
19	20.29	17.89	7.66E-05	57.27	56.78	0.782
20	20.17	18.85	0.050	56.39	56.91	0.711
21	19.57	20.19	0.478	57.82	57.27	0.772
22	20.62	19.97	0.471	62.79	61.54	0.532
23	20.24	21.45	0.160	67.09	66.74	0.847
24	21.79	22.01	0.809	72.21	73.84	0.473
25	20.48	18.26	0.012	76.55	78.66	0.314
26	25.90	22.80	0.000	77.43	77.84	0.870
27	28.76	25.46	0.004	80.08	75.72	0.026
28	30.06	27.34	0.013	81.99	76.98	0.022
29	33.62	33.13	0.584	86.33	74.18	8.49E-06
30	32.72	29.55	0.001	82.70	75.34	0.005
31	34.35	26.78	2.57E-14	90.29	84.63	0.023
32	35.56	29.13	5.07E-11	89.96	88.23	0.419
33	35.18	31.66	2.96E-05	92.48	95.26	0.239
34	33.47	34.70	0.256	101.14	103.96	0.482
35	34.33	39.41	0.000			
36	37.92	36.01	0.245			
37	34.21	34.35	0.913			
38	35.89	33.33	0.016			
39	35.21	35.09	0.927			
40	36.44	40.85	0.001			
41	37.81	41.98	0.097			
42	39.48	43.48	0.098			
43	43.24	41.49	0.341			

Age	Label Rouge chickens			Standard chickens		
	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value
44	40.60	40.83	0.887			
45	44.21	43.85	0.830			
46	40.46	41.69	0.472			
47	40.08	36.95	0.264			
48	49.08	33.42	4.31E-06			
49	49.55	37.24	3.01E-04			
50	53.72	37.02	3.34E-05			
51	46.44	40.98	0.042			
52	39.11	34.98	0.139			
53	38.13	35.01	0.253			
54	40.29	34.46	0.038			
55	43.10	33.35	2.38E-04			
56	42.79	37.00	0.028			
57	42.15	32.80	4.80E-05			
58	41.45	38.67	0.105			
59	35.28	34.58	0.718			
60	28.60	47.92	4.93E-12			
61	31.70	42.69	5.45E-07			
62	28.05	43.40	2.97E-10			
63	34.01	44.30	2.03E-06			
64	37.21	41.34	0.062			
65	38.66	43.16	0.029			
66	39.34	43.59	0.041			
67	40.97	51.72	1.40E-04			
68	36.35	41.91	0.009			
69	38.76	42.18	0.183			
70	36.23	24.60	4.25E-06			
71	36.49	25.30	0.001			
72	34.22	21.30	8.22E-06			
73	35.04	25.09	0.001			
74	35.75	34.92	0.682			
75	28.86	25.72	0.203			
76	28.26	35.21	0.003			
77	25.47	36.84	7.08E-05			
78	33.21	28.95	0.056			
79	30.75	37.07	0.003			
80	31.93	32.24	0.921			

Supplementary table 4.3. Least square means of daily feed intake for alternative (A) and control (C) diets.

Age	Label Rouge chickens			Standard chickens		
	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value
4				17.00	18.30	0.367
5				21.27	23.32	0.149
6				25.62	25.37	0.881
7				28.65	26.11	0.277
8				31.78	31.64	0.949
9				52.08	48.49	0.182
10				54.36	50.76	0.191
11				56.64	53.02	0.200
12				56.12	52.86	0.239
13	26.01	26.22	0.840	61.54	57.90	0.223
14	32.08	32.33	0.801	64.55	60.89	0.238
15	32.85	32.62	0.818	57.08	52.55	0.191
16	37.29	36.44	0.515	71.29	67.60	0.276
17	36.32	37.42	0.361	83.68	82.37	0.764
18	39.37	38.88	0.702	96.95	90.25	0.200
19	42.55	41.26	0.421	97.64	87.23	0.054
20	42.38	38.74	0.035	106.73	97.66	0.105
21	45.35	44.23	0.513	109.98	105.43	0.435
22	47.35	47.11	0.882	117.28	105.10	0.071
23	49.83	54.13	0.054	126.52	117.25	0.050
24	54.33	57.80	0.068	136.85	121.68	0.005
25	59.67	60.69	0.720	140.49	130.86	0.045
26	60.11	66.05	0.037	146.29	136.09	0.108
27	62.84	67.19	0.159	148.96	140.08	0.284
28	62.93	71.02	0.005	167.23	157.03	0.114
29	65.83	70.63	0.202	171.95	161.26	0.110
30	61.95	60.41	0.667	176.80	165.60	0.105
31	67.42	67.38	0.992	167.96	160.81	0.521
32	68.24	67.79	0.913	169.46	170.86	0.889
33	74.12	73.03	0.813	192.03	176.72	0.238
34	69.93	71.78	0.684	199.70	199.28	0.971
35	78.37	76.26	0.689	205.28	204.64	0.957
36	78.09	79.85	0.767	211.02	210.14	0.943
37	89.44	88.67	0.910			
38	92.08	89.98	0.703			
39	91.73	85.14	0.196			
40	86.89	80.33	0.215			

Age	Label Rouge chickens			Standard chickens		
	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value
41	89.26	84.81	0.461			
42	106.81	90.66	0.018			
43	96.96	98.69	0.766			
44	102.08	101.63	0.947			
45	105.02	95.74	0.147			
46	106.22	103.84	0.711			
47	111.38	102.56	0.231			
48	114.70	105.30	0.202			
49	112.85	107.20	0.424			
50	114.81	105.65	0.142			
51	116.94	111.58	0.424			
52	122.25	115.63	0.400			
53	128.36	116.40	0.100			
54	122.11	124.57	0.740			
55	121.89	110.32	0.145			
56	122.24	120.23	0.767			
57	129.91	130.24	0.972			
58	135.18	125.47	0.283			
59	143.14	132.21	0.205			
60	138.42	138.06	0.958			
61	143.36	146.92	0.668			
62	135.51	122.17	0.087			
63	141.08	133.49	0.346			
64	134.37	135.91	0.866			
65	148.76	148.98	0.978			
66	147.55	149.28	0.852			
67	148.22	149.54	0.869			
68	148.70	141.88	0.487			
69	127.58	124.23	0.680			
70	140.10	134.15	0.604			
71	134.36	133.34	0.926			
72	139.55	143.80	0.680			
73	147.01	156.87	0.378			
74	146.82	163.06	0.122			
75	153.53	160.42	0.524			
76	153.77	171.30	0.120			
77	157.66	168.77	0.345			
78	147.84	159.64	0.285			
79	131.26	135.95	0.668			
80	139.08	118.83	0.100			
81	148.64	133.17	0.236			
82	96.67	89.23	0.419			

Supplementary table 4.4. Least square means of daily feed conversion ratio for alternative (A) and control (C) diets.

Age	Label Rouge chickens			Standard chickens		
	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value
5				1.37	1.65	0.035
6				1.68	1.93	0.106
7				1.67	1.62	0.793
8				1.46	1.46	0.992
9				1.98	1.77	0.023
10				1.82	1.70	0.168
11				1.85	1.73	0.229
12				1.89	1.78	0.283
13				2.03	2.01	0.824
14				2.06	1.96	0.297
15	1.71	1.80	0.072	1.66	1.50	0.097
16	1.86	2.01	0.059	1.70	1.59	0.168
17	1.83	2.00	0.019	1.70	1.71	0.895
18	1.89	2.11	0.001	1.79	1.70	0.418
19	2.19	2.29	0.297	1.76	1.58	0.008
20	2.06	2.05	0.911	1.97	1.77	0.042
21	2.34	2.18	0.146	2.00	2.07	0.632
22	2.32	2.28	0.625	1.91	1.76	0.125
23	2.47	2.51	0.789	1.95	1.77	0.005
24	2.64	2.61	0.837	1.89	1.64	0.0004
25	2.89	3.37	0.013	1.88	1.65	0.001
26	2.33	2.90	0.0003	1.89	1.75	0.105
27	2.31	2.56	0.044	1.93	1.80	0.216
28	2.13	2.52	0.0001	2.07	2.03	0.651
29	1.95	2.09	0.186	2.02	2.15	0.217
30	1.94	1.99	0.712	2.14	2.13	0.938
31	2.00	2.45	0.001	1.90	1.95	0.654
32	1.96	2.27	0.021	1.96	2.06	0.463
33	2.12	2.34	0.108	2.07	1.92	0.246
34	2.04	2.09	0.688	2.01	1.91	0.494
35	2.24	1.94	0.017			
36	2.20	2.27	0.637			
37	2.61	2.57	0.839			
38	2.36	2.73	0.026			
39	2.52	2.40	0.492			
40	2.40	1.99	0.006			
41	2.37	2.22	0.344			
42	2.69	2.12	0.001			

Age	Label Rouge chickens			Standard chickens		
	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value
43	2.27	2.33	0.729			
44	2.43	2.47	0.842			
45	2.46	2.20	0.095			
46	2.69	2.53	0.404			
47	2.69	2.87	0.506			
48	2.32	3.41	0.0001			
49	2.55	3.02	0.044			
50	2.25	2.91	0.009			
51	2.48	2.68	0.321			
52	3.00	3.18	0.577			
53	3.27	3.38	0.761			
54	2.96	3.73	0.032			
55	3.15	3.55	0.310			
56	3.12	3.40	0.313			
57	3.16	3.94	0.013			
58	3.30	3.25	0.816			
59	3.89	3.82	0.813			
60	4.39	2.80	0.00005			
61	4.41	3.20	0.00002			
62	4.72	2.81	7.64E-07			
63	4.18	3.16	0.0002			
64	3.35	3.53	0.551			
65	3.78	3.62	0.528			
66	3.87	3.36	0.099			
67	3.50	2.66	0.003			
68	4.10	3.24	0.007			
69	3.29	2.86	0.095			
70	3.74	4.82	0.022			
71	4.01	5.27	0.024			
72	4.67	5.12	0.432			
73	4.43	4.98	0.363			
74	4.38	4.26	0.771			
75	5.08	5.60	0.390			
76	5.46	5.11	0.470			
77	5.61	4.83	0.171			
78	4.65	5.89	0.004			
79	4.09	4.01	0.848			
80	3.91	4.16	0.604			

Supplementary table 4.5. Least square means of cumulative feed conversion ratio for alternative (A) and control (C) diets.

Age	Label Rouge chickens			Standard chickens		
	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value
4				1.02	0.80	0.029
5				1.01	1.01	0.993
6				1.20	1.19	0.949
7				1.24	1.39	0.208
8				1.39	1.46	0.591
9				1.39	1.45	0.608
10				1.41	1.41	0.972
11				1.42	1.40	0.821
12				1.45	1.42	0.791
13				1.43	1.46	0.821
14				1.51	1.49	0.843
15	2.12	2.24	0.182	1.50	1.51	0.982
16	1.97	2.04	0.356	1.53	1.49	0.732
17	1.74	1.87	0.019	1.50	1.48	0.886
18	1.73	1.86	0.023	1.49	1.46	0.754
19	1.71	1.85	0.007	1.46	1.45	0.911
20	1.70	1.82	0.049	1.47	1.44	0.734
21	1.73	1.87	0.011	1.49	1.46	0.740
22	1.74	1.87	0.024	1.51	1.47	0.603
23	1.79	1.87	0.176	1.52	1.49	0.691
24	1.81	1.92	0.090	1.51	1.47	0.675
25	1.86	1.98	0.097	1.52	1.47	0.515
26	1.88	2.02	0.088	1.52	1.45	0.396
27	1.95	2.14	0.026	1.52	1.46	0.431
28	1.86	2.05	0.016	1.53	1.48	0.473
29	1.86	2.03	0.044	1.54	1.50	0.560
30	1.83	2.00	0.037	1.55	1.50	0.570
31	1.82	1.98	0.049	1.54	1.53	0.836
32	1.78	2.00	0.009	1.56	1.53	0.780
33	1.78	2.06	0.002	1.55	1.53	0.777
34	1.75	2.00	0.004	1.60	1.54	0.510
35	1.77	1.97	0.022	1.59	1.55	0.577
36	1.77	1.98	0.031	1.59	1.53	0.516
37	1.78	1.97	0.039			
38	1.77	2.01	0.018			
39	1.80	2.01	0.033			
40	1.79	2.02	0.024			
41	1.82	1.97	0.144			

Age	Label Rouge chickens			Standard chickens		
	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value	Diet A	Diet C	<i>P</i> -value
42	1.84	1.98	0.209			
43	1.86	2.02	0.152			
44	1.84	2.02	0.092			
45	1.86	1.98	0.284			
46	1.88	1.97	0.362			
47	1.87	1.96	0.356			
48	1.89	2.00	0.321			
49	1.90	2.03	0.219			
50	1.86	2.05	0.078			
51	1.88	2.02	0.183			
52	1.88	2.05	0.110			
53	1.93	2.04	0.295			
54	1.94	2.14	0.081			
55	2.01	2.12	0.304			
56	2.00	2.15	0.214			
57	2.01	2.16	0.205			
58	2.03	2.20	0.146			
59	2.08	2.22	0.243			
60	2.08	2.22	0.244			
61	2.12	2.25	0.288			
62	2.17	2.21	0.759			
63	2.19	2.24	0.653			
64	2.21	2.24	0.801			
65	2.22	2.27	0.694			
66	2.23	2.26	0.802			
67	2.24	2.28	0.745			
68	2.27	2.27	0.967			
69	2.27	2.25	0.854			
70	2.28	2.33	0.715			
71	2.35	2.31	0.796			
72	2.36	2.43	0.624			
73	2.36	2.37	0.951			
74	2.39	2.43	0.782			
75	2.41	2.45	0.776			
76	2.45	2.47	0.938			
77	2.52	2.50	0.860			
78	2.55	2.55	0.988			
79	2.54	2.51	0.856			
80	2.52	2.57	0.713			
81	2.58	2.59	0.956			
82	2.60	2.59	0.962			

Supplementary table 4.6. Correlations between daily feed intake and daily measure of weight gain (ADG), body weight (BW), feed conversion ratio (DFCR), cumulative feed conversion ratio (DCFCR), carcass composition (thigh yield TY, breast yield BMY, abdominal fat yield AFY) and meat quality (breast luminance L, redness a*, yellowness b* and ultimate pH pHu), in Label Rouge chickens. CFCRf stands for final cumulative feed conversion ratio.

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
15	18	0.57	1.00	0.30	0.72	0.39	-0.10	0.05	0.07	0.21	0.27	0.02	-0.06	0.39	0.24
16	20	0.26	1.00	0.32	0.63	0.39	-0.03	0.02	0.05	0.28	0.02	0.19	-0.20	0.36	0.21
17	21	0.45	1.00	0.48	0.44	0.46	-0.13	0.02	0.19	0.20	0.26	0.12	0.09	0.42	0.31
18	22	0.74	1.00	0.38	0.51	-0.09	0.13	-0.26	-0.05	0.19	0.18	0.11	0.06	0.32	-0.02
19	23	0.43	1.00	0.34	0.41	0.43	-0.01	-0.14	-0.11	0.07	0.43	-0.02	-0.28	0.50	0.09
20	24	0.55	1.00	0.53	0.49	0.14	0.07	-0.21	-0.15	0.06	0.11	0.05	-0.08	0.25	0.21
21	26	0.55	1.00	0.37	0.35	0.09	-0.28	-0.01	-0.11	0.27	0.17	-0.01	-0.18	0.36	0.03
22	27	0.67	1.00	0.58	0.47	0.13	0.02	0.03	0.20	0.20	0.04	-0.01	0.00	0.39	0.36
23	28	0.56	1.00	0.46	0.52	0.37	0.39	-0.20	0.17	0.02	0.25	-0.20	0.02	0.25	0.39
24	29	0.35	1.00	0.45	0.54	0.29	0.28	-0.22	0.08	-0.11	0.19	-0.26	-0.12	0.14	0.32
25	30	0.04	1.00	0.21	0.82	0.56	0.21	0.07	0.07	-0.01	-0.17	-0.17	-0.04	0.18	0.20
26	32	0.26	1.00	0.34	0.84	0.43	-0.04	-0.12	-0.05	0.31	0.18	-0.01	-0.15	0.39	0.29
27	33	0.27	1.00	0.43	0.79	0.59	-0.07	-0.17	-0.07	0.24	0.22	0.20	-0.14	0.41	0.23
28	34	0.56	1.00	0.39	0.70	0.51	0.15	-0.14	-0.02	0.03	0.20	-0.07	-0.20	0.23	0.56
29	35	0.35	1.00	0.33	0.92	0.55	0.31	-0.02	0.03	-0.12	0.10	-0.01	-0.15	0.23	0.23
30	37	0.44	1.00	0.44	0.87	0.56	-0.09	-0.02	0.00	0.30	0.32	-0.18	-0.05	0.26	0.39
31	38	0.17	1.00	0.29	0.89	0.68	0.01	-0.08	-0.04	0.17	0.36	-0.01	-0.24	0.52	0.25
32	39	-0.01	1.00	0.18	0.90	0.61	0.21	0.11	0.20	-0.23	0.07	-0.15	-0.19	0.23	0.23
33	40	0.30	1.00	0.46	0.84	0.59	-0.01	0.01	0.26	0.03	0.28	0.02	-0.20	0.21	0.35
34	41	0.13	1.00	0.33	0.90	0.69	-0.01	-0.03	0.17	0.14	0.17	-0.02	-0.33	0.47	0.32
35	43	0.42	1.00	0.20	0.74	0.64	-0.14	-0.02	0.11	0.07	0.39	0.03	-0.20	0.41	0.06

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
36	44	0.32	1.00	0.45	0.89	0.61	-0.08	0.04	0.20	0.22	0.11	0.01	-0.15	0.45	0.48
37	45	0.24	1.00	0.35	0.79	0.75	0.22	-0.03	0.20	-0.03	0.15	-0.10	-0.25	0.49	0.37
38	46	0.24	1.00	0.56	0.80	0.33	0.21	0.02	0.23	0.02	-0.11	0.10	0.13	0.40	0.51
39	48	0.36	1.00	0.35	0.68	0.55	0.13	0.06	0.05	-0.01	0.13	-0.27	-0.15	0.30	0.43
40	49	0.35	1.00	0.40	0.67	0.77	0.28	-0.20	0.07	0.01	0.17	-0.17	-0.18	0.52	0.48
41	50	0.05	1.00	0.37	0.84	0.64	0.11	0.00	0.20	-0.09	0.08	-0.08	-0.13	0.40	0.30
42	51	0.45	1.00	0.46	0.72	0.74	-0.03	-0.08	0.02	0.17	0.27	-0.13	-0.15	0.43	0.44
43	52	0.01	1.00	0.41	0.73	0.67	0.14	0.12	0.30	0.07	0.23	-0.18	-0.10	0.42	0.45
44	54	0.19	1.00	0.36	0.58	0.45	0.20	0.02	0.20	-0.04	0.12	-0.11	-0.12	0.27	0.55
45	55	0.40	1.00	0.42	0.49	0.69	0.32	-0.02	0.16	0.04	0.36	0.01	-0.18	0.33	0.41
46	56	0.30	1.00	0.29	0.60	0.65	0.30	-0.02	0.27	0.01	0.15	0.03	-0.12	0.33	0.49
47	57	0.35	1.00	0.33	0.15	0.76	0.28	-0.16	0.12	0.16	0.28	-0.30	-0.04	0.60	0.37
48	59	0.14	1.00	0.41	0.32	0.56	0.14	-0.06	0.16	0.11	0.17	-0.11	0.06	0.43	0.54
49	60	0.16	1.00	0.18	0.49	0.81	0.15	-0.01	0.19	0.13	0.28	-0.06	-0.24	0.49	0.33
50	61	-0.03	1.00	0.22	0.44	0.70	-0.24	0.10	0.01	0.35	0.11	0.05	-0.30	0.51	0.33
51	62	0.31	1.00	0.18	0.40	0.75	0.08	-0.20	0.01	0.22	0.31	0.02	-0.05	0.66	0.50
52	63	0.17	1.00	0.02	0.41	0.66	-0.17	0.18	0.07	0.04	0.31	-0.06	-0.31	0.48	0.38
53	65	-0.07	1.00	0.34	0.56	0.46	-0.08	0.02	0.11	0.33	0.35	0.14	-0.07	0.57	0.34
54	66	0.11	1.00	0.31	0.60	0.41	-0.03	0.06	-0.03	0.38	-0.04	-0.04	-0.35	0.53	0.28
55	67	-0.14	1.00	0.21	0.63	0.41	0.01	0.10	0.31	0.23	0.06	-0.12	-0.03	0.40	0.29
56	68	0.19	1.00	0.07	0.31	0.40	0.06	0.36	0.35	-0.31	-0.06	-0.13	-0.24	0.18	0.11
57	70	0.28	1.00	0.35	0.45	0.56	0.02	0.02	0.14	0.09	0.14	-0.18	-0.23	0.51	0.35
58	71	0.32	1.00	0.43	0.67	0.57	-0.05	0.03	0.07	0.08	0.35	-0.31	0.01	0.66	0.36
59	72	0.16	1.00	0.44	0.66	0.59	-0.05	-0.02	0.02	0.46	0.06	0.02	-0.05	0.68	0.36
60	73	-0.11	1.00	0.25	0.50	0.47	-0.14	0.20	-0.04	0.14	0.17	-0.31	-0.04	0.62	0.20
61	74	0.14	1.00	0.41	0.63	0.35	0.00	-0.12	-0.05	0.01	-0.08	-0.30	-0.15	0.41	0.49

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
62	76	0.22	1.00	0.44	0.45	0.23	-0.17	0.16	-0.13	0.38	-0.20	-0.03	0.15	0.40	0.46
63	77	0.30	1.00	0.43	0.36	0.49	0.08	-0.04	0.00	0.08	0.01	-0.16	0.14	0.55	0.44
64	78	0.31	1.00	0.57	0.38	0.41	0.05	-0.01	0.10	0.16	0.04	0.02	-0.04	0.46	0.52
65	79	0.35	1.00	0.35	0.30	0.31	0.14	-0.17	-0.02	0.03	0.06	0.03	0.07	0.32	0.41
66	80	0.23	1.00	0.32	0.46	0.41	0.19	-0.42	-0.23	0.11	0.20	-0.04	-0.08	0.58	0.34
67	82	0.05	1.00	0.25	0.58	0.52	0.09	-0.24	0.01	0.20	0.13	0.11	0.10	0.54	0.28
68	83	-0.03	1.00	0.37	0.78	0.54	-0.12	0.11	-0.06	0.34	-0.13	-0.07	0.36	0.51	0.43
69	84	0.28	1.00	0.40	0.46	0.52	0.08	-0.21	-0.14	0.16	-0.24	-0.14	0.06	0.55	0.43
70	85	-0.02	1.00	0.44	0.67	0.52	0.13	-0.09	0.01	0.36	0.05	-0.15	0.20	0.57	0.43
71	87	0.06	1.00	0.15	0.47	0.37	-0.10	-0.08	0.03	0.33	-0.40	0.15	-0.02	0.52	0.09
72	88	0.25	1.00	0.45	0.40	0.50	0.11	-0.35	-0.22	0.35	-0.20	-0.02	0.24	0.53	0.45
73	89	0.08	1.00	0.14	0.43	0.40	-0.23	-0.11	-0.14	0.36	0.01	0.05	0.11	0.31	0.14
74	90	0.07	1.00	0.23	0.70	0.50	0.02	-0.30	-0.21	0.33	-0.05	0.21	0.20	0.54	0.24
75	91	0.03	1.00	0.46	0.61	0.39	0.02	-0.34	-0.14	0.46	0.08	0.01	0.25	0.57	0.27
76	93	0.10	1.00	0.37	0.57	0.51	-0.04	-0.15	-0.14	0.23	-0.18	0.01	0.07	0.50	0.41
77	94	-0.11	1.00	0.46	0.47	0.53	-0.11	-0.18	-0.17	0.47	-0.02	0.11	0.15	0.52	0.48
78	95	0.47	1.00	0.16	0.57	0.56	-0.09	-0.19	0.06	0.25	-0.17	0.00	0.11	0.55	0.16
79	96	0.08	1.00	0.54	0.59	0.33	-0.14	-0.10	-0.29	0.41	-0.16	0.24	0.25	0.34	0.52
80	98	-0.07	1.00	0.33	0.68	0.45	-0.23	-0.16	-0.40	0.54	0.14	0.24	0.19	0.51	0.30
Classical diet															
15	18	0.52	1.00	0.52	0.73	0.47	0.11	0.12	0.10	-0.10	0.29	0.30	-0.35	0.43	0.06
16	20	-0.11	1.00	0.42	0.86	0.27	-0.02	0.17	-0.14	0.06	0.29	0.22	-0.29	0.12	-0.05
17	21	0.14	1.00	0.37	0.74	0.56	0.07	0.16	0.08	0.00	0.17	0.26	-0.15	0.14	0.01
18	22	0.50	1.00	0.15	0.32	0.36	-0.14	0.25	0.06	0.11	-0.18	0.12	0.16	0.06	-0.02
19	23	0.30	1.00	0.19	0.70	0.35	0.08	0.06	0.17	-0.10	-0.12	0.18	0.09	0.15	0.16
20	24	0.47	1.00	0.45	0.43	0.22	0.22	-0.04	-0.02	-0.03	0.06	0.20	0.11	0.14	0.17

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
21	26	0.16	1.00	0.17	0.50	0.53	0.15	-0.09	-0.01	-0.05	0.20	0.48	-0.20	0.52	-0.01
22	27	0.60	1.00	0.48	-0.07	0.21	-0.08	-0.07	0.02	0.20	0.20	0.12	-0.03	0.11	0.30
23	28	0.09	1.00	0.16	0.47	0.37	0.21	0.01	0.08	0.01	-0.01	0.30	-0.25	0.32	0.23
24	29	0.24	1.00	0.14	0.38	0.44	-0.13	0.18	0.16	0.15	0.30	0.09	-0.13	0.37	0.14
25	30	0.24	1.00	0.08	0.37	0.57	0.24	-0.04	0.19	-0.27	0.34	0.38	-0.08	0.34	0.09
26	32	0.22	1.00	0.09	0.28	0.38	0.42	-0.15	0.17	-0.45	0.46	0.19	-0.15	0.12	0.22
27	33	0.22	1.00	0.21	0.39	0.26	0.09	-0.29	-0.09	0.08	0.27	0.05	0.06	0.13	0.28
28	34	0.44	1.00	0.30	0.62	0.17	-0.10	-0.12	-0.23	0.13	0.07	0.20	0.11	0.17	0.33
29	35	0.39	1.00	0.21	0.73	0.28	0.00	0.02	0.01	0.14	-0.10	0.11	-0.05	0.23	0.28
30	37	0.32	1.00	0.45	0.68	0.02	-0.25	0.33	0.06	0.21	-0.03	0.29	-0.24	0.22	0.27
31	38	0.38	1.00	0.46	0.71	0.20	0.04	0.31	0.22	-0.02	0.16	0.15	-0.08	0.05	0.39
32	39	0.35	1.00	0.33	0.80	0.27	-0.19	0.38	0.17	0.15	0.15	0.01	0.00	0.06	0.42
33	40	0.16	1.00	0.40	0.83	0.13	-0.17	0.05	-0.25	0.32	-0.09	0.29	-0.17	0.33	0.31
34	41	0.35	1.00	0.44	0.74	0.19	0.00	0.16	0.16	0.16	0.26	0.03	-0.11	0.29	0.46
35	43	0.28	1.00	0.30	0.92	0.55	-0.15	0.11	0.10	0.16	0.21	0.05	0.00	0.23	0.35
36	44	0.26	1.00	0.08	0.84	0.62	-0.26	0.16	-0.04	0.35	-0.01	-0.22	0.03	0.19	0.20
37	45	0.25	1.00	0.10	0.91	0.54	-0.03	0.01	0.11	0.17	0.27	-0.26	0.06	0.34	0.16
38	46	0.23	1.00	0.13	0.79	0.60	-0.22	0.20	-0.05	0.30	0.22	0.05	-0.13	0.46	0.16
39	48	-0.05	1.00	-0.12	0.84	0.70	-0.38	0.41	0.07	0.44	0.19	-0.03	0.01	0.66	0.02
40	49	-0.14	1.00	0.29	0.92	0.24	0.02	-0.02	0.19	0.03	0.18	-0.14	0.07	0.31	0.38
41	50	0.07	1.00	0.07	0.89	0.71	-0.39	0.40	-0.03	0.37	0.33	0.21	-0.13	0.58	0.15
42	51	0.34	1.00	-0.03	0.55	0.13	-0.32	0.40	0.15	0.17	0.16	0.14	-0.15	0.42	0.05
43	52	0.45	1.00	0.16	0.70	0.31	-0.29	0.22	0.08	0.40	0.03	-0.07	-0.18	0.62	0.11
44	54	0.56	1.00	0.47	0.66	0.10	0.11	-0.14	0.09	-0.04	0.28	0.06	0.07	0.29	0.47
45	55	0.40	1.00	0.14	0.79	0.40	-0.19	0.05	-0.03	0.23	0.22	0.20	-0.06	0.64	0.19
46	56	-0.08	1.00	0.50	0.77	0.41	-0.25	0.35	0.06	0.12	0.24	0.40	-0.01	0.47	0.29

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
47	57	0.32	1.00	0.25	0.69	0.26	0.01	-0.11	-0.04	-0.01	0.06	0.26	-0.22	0.53	0.27
48	59	0.10	1.00	0.38	0.58	0.42	-0.20	0.12	-0.06	0.25	0.11	0.13	0.06	0.53	0.35
49	60	-0.16	1.00	0.13	0.84	0.53	-0.29	0.28	-0.05	0.24	0.19	0.29	-0.25	0.71	0.22
50	61	-0.01	1.00	0.06	0.52	0.59	-0.12	0.02	-0.14	0.13	0.11	0.40	-0.30	0.68	0.18
51	62	-0.01	1.00	0.05	0.75	0.55	-0.31	0.22	-0.20	0.28	0.03	0.39	-0.15	0.68	0.17
52	63	0.30	1.00	-0.10	0.59	0.41	-0.23	0.21	-0.06	0.26	0.09	0.06	-0.07	0.45	0.07
53	65	0.03	1.00	0.10	0.59	0.57	-0.15	0.09	-0.03	0.16	0.24	0.29	-0.32	0.66	0.16
54	66	-0.04	1.00	-0.06	0.77	0.69	-0.39	0.18	-0.28	0.49	0.17	0.03	-0.03	0.75	0.06
55	67	-0.25	1.00	0.08	0.67	0.59	-0.24	0.25	-0.04	0.24	0.15	0.22	-0.11	0.70	0.11
56	68	0.07	1.00	-0.14	0.64	0.75	-0.42	0.29	-0.07	0.53	0.21	-0.14	-0.06	0.65	-0.02
57	70	0.12	1.00	0.24	0.53	0.48	-0.13	-0.05	-0.08	0.18	-0.15	0.07	-0.07	0.50	0.32
58	71	0.15	1.00	0.30	0.79	0.56	-0.32	0.04	-0.12	0.40	0.24	-0.05	-0.09	0.56	0.36
59	72	-0.10	1.00	0.32	0.75	0.24	0.04	-0.24	-0.06	-0.10	-0.03	0.04	0.02	0.30	0.38
60	73	-0.08	1.00	-0.18	0.69	0.65	-0.27	-0.02	-0.31	0.34	0.16	0.11	-0.47	0.66	0.02
61	74	0.52	1.00	0.21	0.52	0.58	-0.23	0.10	-0.10	0.18	0.18	0.22	-0.35	0.48	0.24
62	76	0.24	1.00	0.01	0.63	0.55	0.00	-0.20	-0.22	-0.01	-0.04	0.06	-0.17	0.55	0.07
63	77	0.06	1.00	0.29	0.73	0.37	-0.33	0.18	-0.05	0.30	-0.03	0.16	-0.05	0.55	0.30
64	78	0.12	1.00	0.27	0.72	0.63	-0.24	0.08	-0.12	0.33	0.20	0.15	-0.02	0.76	0.31
65	79	0.30	1.00	0.03	0.59	0.34	-0.27	-0.13	-0.27	0.29	0.08	-0.14	0.07	0.55	0.15
66	80	0.11	1.00	-0.06	0.75	0.63	-0.17	-0.01	-0.13	0.22	-0.02	0.14	-0.36	0.79	0.04
67	82	0.35	1.00	-0.03	0.39	0.53	-0.10	-0.25	-0.26	0.17	0.03	0.18	-0.22	0.69	0.09
68	83	0.29	1.00	0.10	0.64	0.46	-0.14	-0.24	-0.23	0.28	-0.02	-0.03	-0.12	0.61	0.12
69	84	0.24	1.00	0.14	0.61	0.41	-0.02	-0.12	-0.02	0.17	0.15	0.18	-0.08	0.59	0.12
70	85	0.22	1.00	0.39	0.44	0.29	0.05	0.07	0.27	0.00	0.18	-0.05	-0.03	0.48	0.41
71	87	0.20	1.00	0.13	0.35	0.65	-0.08	0.03	0.07	0.08	0.05	0.32	-0.26	0.73	0.22

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
72	88	0.33	1.00	0.34	0.49	0.48	-0.28	-0.09	-0.35	0.33	0.00	-0.03	0.37	0.51	0.43
73	89	0.54	1.00	0.70	0.30	0.31	-0.41	0.02	-0.34	0.30	0.21	0.01	-0.16	0.57	0.70
74	90	-0.01	1.00	0.08	0.72	0.49	-0.12	0.02	0.07	0.27	0.33	-0.18	-0.20	0.63	0.12
75	91	0.14	1.00	0.21	0.69	0.67	-0.04	0.17	0.03	0.28	0.23	-0.01	-0.13	0.74	0.16
76	93	0.27	1.00	0.32	0.63	0.41	-0.32	0.09	-0.05	0.45	0.18	-0.18	-0.03	0.47	0.34
77	94	0.03	1.00	0.36	0.57	0.51	-0.03	-0.23	-0.18	0.06	0.34	0.15	-0.17	0.60	0.40
78	95	0.38	1.00	0.41	0.57	0.31	-0.20	0.13	-0.15	0.17	0.11	0.24	-0.10	0.33	0.46
79	96	0.28	1.00	0.30	0.64	0.73	-0.18	0.21	-0.01	0.26	0.26	0.06	0.01	0.75	0.39
80	98	0.41	1.00	0.02	0.32	0.44	-0.25	0.41	-0.02	0.10	-0.15	0.29	-0.33	0.56	-0.05

Supplementary table 4.7. Correlations between daily weight gain and daily measure of feed intake (ADFI), body weight (BW), feed conversion ratio (DFCR), cumulative feed conversion ratio (DCFCR), carcass composition (thigh yield TY, breast yield BMY, abdominal fat yield AFY) and meat quality (breast luminance L, redness a, yellowness b* and ultimate pH pHu), in Label Rouge chickens. CFCRf stands for final cumulative feed conversion ratio.*

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
15	18	1.00	0.57	0.38	-0.16	0.01	0.06	-0.06	-0.05	0.29	0.36	0.23	0.28	0.28	0.40
16	20	1.00	0.26	0.35	-0.58	-0.01	0.00	-0.12	0.01	0.44	0.23	0.19	0.24	0.41	0.33
17	21	1.00	0.45	0.50	-0.60	0.04	-0.01	-0.21	-0.26	0.38	0.42	0.16	0.07	0.23	0.40
18	22	1.00	0.74	0.53	-0.19	-0.38	0.14	-0.18	-0.16	0.23	0.26	0.09	0.13	0.24	0.26
19	23	1.00	0.43	0.48	-0.63	-0.26	-0.07	-0.03	-0.14	0.21	0.23	-0.03	-0.03	0.02	0.26
20	24	1.00	0.55	0.72	-0.46	-0.18	-0.18	0.11	-0.09	0.32	0.28	0.01	0.16	0.15	0.39
21	26	1.00	0.55	0.65	-0.57	-0.32	-0.11	0.10	0.10	0.25	0.12	0.01	0.20	0.15	0.33
22	27	1.00	0.67	0.68	-0.34	-0.17	-0.09	0.19	0.28	0.08	0.10	0.07	0.02	0.06	0.35
23	28	1.00	0.56	0.63	-0.40	-0.14	0.06	-0.09	0.02	0.01	0.32	0.03	0.16	0.07	0.38
24	29	1.00	0.35	0.66	-0.59	-0.37	0.03	0.03	0.27	-0.04	0.05	0.08	0.08	0.06	0.44
25	30	1.00	0.04	0.74	-0.52	-0.23	0.06	-0.06	0.08	0.13	0.29	0.07	0.11	0.05	0.61
26	32	1.00	0.26	0.87	-0.28	-0.48	-0.06	-0.10	-0.07	0.32	0.01	0.54	0.05	0.00	0.63
27	33	1.00	0.27	0.78	-0.37	-0.28	0.05	-0.02	0.10	0.31	0.14	0.16	0.28	0.08	0.65
28	34	1.00	0.56	0.75	-0.20	-0.08	0.32	-0.20	0.10	0.12	0.04	0.12	0.25	0.00	0.59
29	35	1.00	0.35	0.79	-0.04	-0.26	0.39	-0.15	0.08	-0.19	0.22	0.20	0.31	-0.18	0.63
30	37	1.00	0.44	0.54	-0.05	-0.09	0.03	-0.02	-0.06	0.04	0.38	0.00	0.18	-0.01	0.52
31	38	1.00	0.17	0.11	-0.30	0.28	-0.04	0.07	0.03	-0.22	0.22	0.11	-0.21	-0.01	0.16
32	39	1.00	-0.01	0.18	-0.44	-0.16	-0.26	0.13	-0.01	0.16	0.19	-0.02	-0.10	-0.24	0.29
33	40	1.00	0.30	0.13	-0.26	0.08	-0.05	0.15	0.19	-0.10	-0.22	0.13	0.14	0.03	0.09
34	41	1.00	0.13	0.74	-0.29	-0.15	0.22	-0.10	0.12	0.14	0.03	0.10	0.23	-0.18	0.60
35	43	1.00	0.42	0.23	-0.28	0.60	0.22	-0.12	0.08	-0.28	0.23	0.33	-0.19	-0.12	0.23

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
36	44	1.00	0.32	0.48	-0.12	0.03	0.17	0.01	0.15	-0.16	0.17	0.10	0.18	0.13	0.53

37	45	1.00	0.24	0.67	-0.39	0.04	0.04	-0.11	-0.04	0.23	0.41	0.08	0.01	-0.09	0.70
38	46	1.00	0.24	0.31	-0.37	-0.04	0.20	0.00	0.13	-0.16	0.24	-0.12	0.36	-0.05	0.37
39	48	1.00	0.36	0.57	-0.39	-0.17	0.20	0.12	0.32	-0.12	0.01	0.12	0.13	-0.28	0.38
40	49	1.00	0.35	0.47	-0.43	-0.02	0.21	-0.28	-0.18	-0.07	0.51	-0.01	0.11	-0.22	0.48
41	50	1.00	0.05	0.06	-0.48	-0.10	0.28	-0.13	0.10	-0.20	-0.29	0.15	0.23	-0.32	0.30
42	51	1.00	0.45	0.37	-0.25	0.26	0.14	-0.15	-0.07	-0.04	0.18	0.37	-0.03	-0.02	0.44
43	52	1.00	0.01	0.25	-0.65	-0.06	-0.03	-0.20	-0.06	0.41	0.16	0.55	-0.14	0.09	0.20
44	54	1.00	0.19	0.42	-0.63	0.05	0.05	-0.20	0.14	0.23	-0.20	0.19	0.03	0.11	0.40
45	55	1.00	0.40	0.29	-0.58	0.16	0.30	-0.32	-0.08	-0.32	0.11	0.12	-0.19	0.03	0.55
46	56	1.00	0.30	0.28	-0.54	0.07	0.58	-0.19	0.05	-0.24	-0.02	-0.31	-0.01	0.01	0.27
47	57	1.00	0.35	0.17	-0.73	0.13	0.01	-0.30	-0.48	0.01	0.35	-0.07	0.09	0.16	0.29
48	59	1.00	0.14	0.23	-0.80	0.01	0.20	-0.34	-0.53	-0.04	0.22	-0.23	0.11	0.02	0.30
49	60	1.00	0.16	0.15	-0.73	-0.02	0.29	-0.24	-0.14	-0.16	-0.07	-0.12	0.04	-0.18	0.28
50	61	1.00	-0.03	0.26	-0.83	-0.08	-0.03	-0.17	-0.10	-0.02	0.02	-0.09	0.26	0.01	0.12
51	62	1.00	0.31	0.25	-0.69	0.14	0.23	-0.29	0.05	0.13	0.00	-0.25	0.00	0.10	0.34
52	63	1.00	0.17	0.22	-0.75	-0.19	-0.33	0.32	0.24	0.08	-0.07	0.13	-0.06	0.01	0.08
53	65	1.00	-0.07	0.33	-0.76	0.26	0.54	-0.29	0.06	-0.16	0.23	0.04	-0.20	-0.13	0.18
54	66	1.00	0.11	0.15	-0.66	0.36	0.19	-0.10	-0.32	0.16	0.42	-0.12	0.05	0.18	0.26
55	67	1.00	-0.14	0.25	-0.79	0.02	-0.09	-0.01	-0.06	0.01	0.37	-0.08	0.06	0.21	0.09
56	68	1.00	0.19	0.63	-0.82	-0.02	0.34	-0.15	-0.11	0.07	0.08	-0.08	0.23	-0.03	0.57
57	70	1.00	0.28	0.46	-0.57	0.12	0.31	-0.19	0.31	-0.18	0.17	-0.22	-0.16	-0.02	0.47
58	71	1.00	0.32	0.53	-0.45	0.19	0.09	-0.25	-0.14	0.18	0.04	-0.18	0.04	0.05	0.51
59	72	1.00	0.16	0.12	-0.60	-0.08	0.19	-0.24	0.17	0.16	-0.04	0.21	-0.03	-0.04	0.14
60	73	1.00	-0.11	0.47	-0.83	-0.18	0.07	-0.36	-0.12	0.25	0.22	0.19	0.31	-0.30	0.56
61	74	1.00	0.14	0.21	-0.65	-0.12	-0.23	-0.13	-0.23	0.01	0.36	-0.10	-0.10	-0.05	0.17
Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
62	76	1.00	0.22	0.09	-0.73	-0.28	0.07	0.01	-0.03	-0.01	0.16	0.26	0.22	-0.34	0.18
63	77	1.00	0.30	0.44	-0.74	0.15	0.31	-0.15	-0.08	-0.05	0.10	-0.05	0.34	-0.07	0.57
64	78	1.00	0.31	0.57	-0.67	-0.01	0.16	-0.11	-0.10	0.06	0.03	0.00	0.12	-0.06	0.59

65	79	1.00	0.35	0.41	-0.75	-0.21	0.51	-0.38	-0.01	-0.36	-0.11	-0.01	0.16	-0.23	0.46
66	80	1.00	0.23	0.48	-0.70	0.19	0.20	-0.20	-0.05	-0.11	0.13	-0.03	-0.06	0.01	0.53
67	82	1.00	0.05	0.41	-0.69	0.05	0.22	-0.17	-0.17	0.00	0.12	0.09	0.09	0.04	0.43
68	83	1.00	-0.03	0.26	-0.63	0.01	0.12	-0.19	-0.39	0.14	0.14	0.13	-0.08	-0.09	0.34
69	84	1.00	0.28	0.30	-0.66	0.22	-0.22	0.03	-0.20	0.45	-0.03	0.30	-0.18	0.39	0.17
70	85	1.00	-0.02	0.20	-0.70	-0.25	0.25	-0.10	-0.03	-0.10	-0.25	0.02	-0.03	-0.34	0.23
71	87	1.00	0.06	0.17	-0.76	-0.10	0.29	-0.24	-0.11	-0.15	-0.14	0.00	0.01	-0.26	0.24
72	88	1.00	0.25	0.35	-0.74	0.02	0.22	-0.29	-0.18	-0.10	0.14	-0.08	-0.01	-0.02	0.36
73	89	1.00	0.08	0.42	-0.77	-0.17	0.29	-0.24	-0.19	-0.20	-0.29	0.01	0.31	-0.15	0.44
74	90	1.00	0.07	0.52	-0.64	-0.10	-0.02	-0.16	-0.45	0.07	0.02	0.04	0.19	-0.18	0.54
75	91	1.00	0.03	0.38	-0.73	-0.10	0.20	0.05	0.12	-0.16	0.35	-0.14	-0.06	-0.19	0.51
76	93	1.00	0.10	0.43	-0.71	-0.13	0.01	-0.19	0.04	-0.04	-0.02	0.20	0.00	-0.17	0.43
77	94	1.00	-0.11	0.17	-0.71	-0.15	-0.18	0.26	0.17	-0.16	0.44	0.00	-0.27	-0.14	0.14
78	95	1.00	0.47	0.28	-0.42	0.23	0.01	0.02	0.04	0.09	0.11	0.12	0.12	0.22	0.29
79	96	1.00	0.08	0.28	-0.69	-0.16	0.24	-0.10	-0.13	-0.17	-0.27	-0.03	-0.03	-0.25	0.27
80	98	1.00	-0.07	0.34	-0.71	-0.14	0.15	-0.30	-0.32	0.07	-0.13	-0.06	0.37	-0.25	0.33
Classical diet															
15	18	1.00	0.52	0.46	-0.20	-0.19	0.28	-0.15	0.12	-0.29	0.18	-0.10	-0.10	0.01	0.25
16	20	1.00	-0.11	0.15	-0.59	-0.49	0.27	-0.24	0.17	-0.25	0.00	-0.34	0.24	-0.33	0.26
17	21	1.00	0.14	0.31	-0.55	-0.30	0.44	-0.10	0.46	-0.38	0.17	-0.19	0.32	-0.33	0.44
18	22	1.00	0.50	0.31	-0.65	-0.44	0.00	-0.10	-0.14	-0.02	-0.19	-0.15	0.37	-0.33	0.26
19	23	1.00	0.30	0.61	-0.46	-0.27	-0.02	-0.12	-0.08	-0.01	0.20	0.09	0.29	-0.04	0.62
20	24	1.00	0.47	0.75	-0.58	-0.08	-0.24	0.10	-0.13	0.19	-0.06	0.14	0.20	-0.04	0.51
Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
21	26	1.00	0.16	0.70	-0.76	-0.10	-0.12	-0.10	-0.25	0.10	-0.12	0.27	0.15	-0.15	0.58
22	27	1.00	0.60	0.64	-0.83	-0.21	-0.26	0.01	-0.10	0.20	-0.03	0.40	-0.02	-0.12	0.48
23	28	1.00	0.09	0.50	-0.79	-0.43	-0.07	0.02	-0.06	-0.08	-0.30	0.19	0.07	-0.22	0.40
24	29	1.00	0.24	0.73	-0.79	-0.28	-0.05	0.24	0.28	-0.06	0.11	0.02	0.19	-0.23	0.69
25	30	1.00	0.24	0.54	-0.79	-0.08	0.00	0.23	0.23	-0.16	0.05	0.12	0.08	-0.11	0.60

26	32	1.00	0.22	0.72	-0.84	-0.36	0.05	-0.03	0.07	-0.08	0.02	-0.04	0.30	-0.25	0.72
27	33	1.00	0.22	0.75	-0.79	-0.49	-0.04	0.01	0.01	0.07	0.18	0.02	0.25	-0.31	0.76
28	34	1.00	0.44	0.69	-0.43	-0.40	-0.16	-0.13	-0.17	0.10	-0.15	0.20	0.23	-0.26	0.75
29	35	1.00	0.39	0.73	-0.33	-0.39	0.03	0.01	0.00	-0.01	0.02	0.14	0.15	-0.15	0.71
30	37	1.00	0.32	0.82	-0.47	-0.41	0.06	-0.04	0.00	0.00	0.27	0.03	0.13	-0.10	0.78
31	38	1.00	0.38	0.75	-0.38	-0.42	0.10	-0.02	0.04	-0.15	0.08	0.17	0.06	-0.12	0.72
32	39	1.00	0.35	0.65	-0.26	-0.41	0.11	0.15	0.09	-0.15	0.05	0.11	0.03	-0.31	0.61
33	40	1.00	0.16	0.53	-0.39	-0.24	0.06	0.04	0.08	-0.10	0.12	-0.05	0.21	-0.23	0.52
34	41	1.00	0.35	0.56	-0.35	-0.32	-0.24	0.27	0.16	-0.02	0.11	-0.17	0.24	-0.47	0.59
35	43	1.00	0.28	0.38	-0.11	0.12	0.13	0.13	0.22	-0.17	0.47	0.04	0.04	-0.26	0.55
36	44	1.00	0.26	0.52	-0.29	-0.01	0.07	0.04	0.03	-0.15	0.20	0.21	-0.03	-0.20	0.57
37	45	1.00	0.25	0.53	-0.15	-0.07	-0.03	-0.01	0.02	-0.02	0.30	0.19	-0.04	-0.14	0.61
38	46	1.00	0.23	0.33	-0.40	0.31	-0.07	0.30	-0.03	-0.01	0.17	0.32	-0.21	-0.14	0.32
39	48	1.00	-0.05	0.41	-0.57	-0.08	-0.10	0.09	-0.02	0.07	0.31	-0.36	0.14	-0.27	0.33
40	49	1.00	-0.14	0.36	-0.51	-0.25	0.08	0.05	0.13	-0.10	0.37	-0.14	0.11	-0.41	0.26
41	50	1.00	0.07	0.66	-0.38	-0.23	0.19	-0.03	0.12	-0.20	0.28	-0.17	0.17	-0.41	0.51
42	51	1.00	0.34	0.00	-0.56	-0.48	0.00	-0.05	-0.07	-0.01	-0.11	-0.03	0.17	-0.01	0.10
43	52	1.00	0.45	0.45	-0.31	-0.01	0.08	-0.16	-0.06	-0.05	-0.15	0.26	-0.03	0.13	0.45
44	54	1.00	0.56	0.48	-0.23	0.13	0.09	-0.35	-0.13	0.09	0.27	0.05	0.18	0.20	0.53
45	55	1.00	0.40	0.34	-0.24	0.22	-0.17	-0.11	-0.05	0.09	0.22	-0.05	0.00	0.06	0.43
46	56	1.00	-0.08	0.11	-0.67	-0.16	0.01	-0.17	0.04	-0.10	-0.07	-0.13	0.21	0.01	0.19
Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
47	57	1.00	0.32	0.35	-0.40	0.29	-0.14	0.01	0.10	0.07	0.32	-0.18	0.04	0.01	0.39
48	59	1.00	0.10	0.60	-0.71	-0.33	0.14	-0.05	0.20	-0.21	-0.08	0.03	0.06	-0.18	0.55
49	60	1.00	-0.16	0.41	-0.65	-0.41	0.31	-0.12	0.11	-0.22	-0.13	0.00	0.29	-0.24	0.46
50	61	1.00	-0.01	0.60	-0.81	-0.14	0.11	-0.04	-0.09	-0.06	0.24	-0.13	0.16	-0.43	0.65
51	62	1.00	-0.01	0.55	-0.64	-0.40	0.16	-0.14	0.10	-0.21	0.03	0.09	0.03	-0.12	0.47
52	63	1.00	0.30	0.36	-0.54	0.07	-0.03	0.13	0.09	-0.12	0.05	0.17	-0.14	-0.07	0.37
53	65	1.00	0.03	0.56	-0.73	-0.37	0.12	-0.21	0.08	-0.20	0.22	-0.10	0.06	-0.14	0.57

54	66	1.00	-0.04	0.46	-0.63	-0.15	0.15	-0.04	0.22	-0.02	0.21	-0.06	0.16	0.04	0.46
55	67	1.00	-0.25	0.26	-0.83	-0.23	0.16	-0.11	0.09	-0.06	0.15	-0.18	0.26	-0.39	0.46
56	68	1.00	0.07	0.50	-0.68	-0.09	0.17	-0.11	0.21	-0.18	0.11	-0.09	0.12	-0.12	0.45
57	70	1.00	0.12	0.40	-0.67	-0.09	-0.02	-0.04	-0.13	0.02	0.07	0.20	0.13	-0.22	0.35
58	71	1.00	0.15	0.47	-0.46	-0.29	-0.08	0.14	0.14	0.02	-0.14	-0.09	0.24	-0.24	0.47
59	72	1.00	-0.10	0.31	-0.71	0.01	-0.24	0.28	-0.07	0.16	0.07	0.28	-0.27	0.01	0.36
60	73	1.00	-0.08	0.31	-0.71	-0.07	-0.13	0.07	-0.07	0.23	-0.04	0.12	-0.01	-0.06	0.31
61	74	1.00	0.52	0.30	-0.44	0.10	-0.33	0.17	-0.05	0.39	0.17	0.07	-0.16	0.12	0.40
62	76	1.00	0.24	0.48	-0.55	0.14	-0.14	0.02	-0.01	0.05	0.22	0.08	-0.16	0.07	0.57
63	77	1.00	0.06	0.59	-0.62	-0.21	0.24	-0.23	0.08	-0.19	0.10	0.07	0.21	-0.20	0.65
64	78	1.00	0.12	0.62	-0.57	-0.30	0.25	-0.35	0.06	-0.21	0.34	0.01	0.10	-0.16	0.65
65	79	1.00	0.30	0.33	-0.56	0.02	0.06	-0.12	-0.08	-0.08	0.16	-0.22	0.11	-0.11	0.34
66	80	1.00	0.11	-0.19	-0.54	0.24	-0.18	0.03	-0.20	0.21	0.13	-0.27	0.15	0.26	-0.10
67	82	1.00	0.35	0.07	-0.63	0.02	-0.35	-0.23	-0.42	0.38	-0.05	-0.12	-0.07	0.13	0.09
68	83	1.00	0.29	0.24	-0.52	0.37	-0.21	0.11	0.04	0.20	0.28	0.00	-0.25	0.23	0.28
69	84	1.00	0.24	0.00	-0.55	0.29	-0.03	0.16	0.16	0.01	0.13	0.03	0.00	0.16	0.12
70	85	1.00	0.22	0.61	-0.72	-0.30	-0.02	-0.30	-0.26	0.20	0.04	0.03	0.05	-0.23	0.60
71	87	1.00	0.20	0.58	-0.76	-0.14	0.16	-0.11	0.15	-0.09	0.37	-0.21	0.11	0.03	0.56
72	88	1.00	0.33	0.21	-0.64	-0.01	-0.14	-0.19	-0.31	-0.16	-0.22	0.14	0.18	-0.22	0.35
Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMV	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
73	89	1.00	0.54	0.06	-0.60	0.23	-0.18	-0.27	-0.51	0.13	-0.14	0.02	-0.26	0.39	0.09
74	90	1.00	-0.01	0.55	-0.67	-0.36	0.04	-0.20	-0.13	-0.20	-0.25	0.19	0.08	-0.28	0.56
75	91	1.00	0.14	0.22	-0.58	0.00	0.27	-0.12	0.08	-0.14	0.04	-0.20	0.20	0.00	0.24
76	93	1.00	0.27	-0.03	-0.52	0.01	-0.21	0.10	-0.12	0.09	-0.23	0.15	-0.21	0.07	0.00
77	94	1.00	0.03	0.40	-0.77	-0.44	-0.22	0.00	-0.09	0.10	-0.25	0.10	0.18	-0.48	0.42
78	95	1.00	0.38	0.40	-0.50	0.04	-0.20	-0.16	-0.16	0.11	-0.02	-0.14	0.22	-0.01	0.49
79	96	1.00	0.28	0.26	-0.47	0.28	-0.43	0.29	0.05	0.21	0.18	0.08	-0.23	0.27	0.26
80	98	1.00	0.41	-0.05	-0.67	0.44	-0.10	0.14	-0.01	0.02	0.10	-0.04	0.11	0.41	0.00

Supplementary table 4.8. Correlations between body weight and daily measure of weight gain (ADG), feed intake (ADFI), body weight (BW), feed conversion ratio (DFCR), cumulative feed conversion ratio (DCFCR), carcass composition (thigh yield TY, breast yield BMY, abdominal fat yield AFY) and meat quality (breast luminance L, redness a*, yellowness b* and ultimate pH pHu), in Label Rouge chickens. CFCRf stands for final cumulative feed conversion ratio.

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
15	18	0.38	0.30	1.00	0.01	0.05	0.31	-0.15	0.14	-0.19	0.09	0.36	0.09	-0.28	0.66
16	20	0.35	0.32	1.00	-0.01	-0.13	0.31	-0.22	0.10	-0.13	0.14	0.42	0.11	-0.18	0.67
17	21	0.50	0.48	1.00	-0.05	0.02	0.26	-0.21	0.03	0.02	0.22	0.40	0.15	-0.11	0.70
18	22	0.53	0.38	1.00	-0.14	-0.16	0.34	-0.29	0.05	-0.03	0.19	0.43	0.14	-0.14	0.67
19	23	0.48	0.34	1.00	-0.14	-0.20	0.36	-0.33	-0.09	-0.03	0.20	0.41	0.05	-0.17	0.67
20	24	0.72	0.53	1.00	-0.19	-0.08	0.21	-0.23	-0.08	0.13	0.27	0.34	0.13	0.02	0.65
21	26	0.65	0.37	1.00	-0.37	-0.20	0.11	-0.10	-0.01	0.16	0.29	0.27	0.09	0.00	0.64
22	27	0.68	0.58	1.00	-0.06	-0.28	0.09	-0.14	-0.06	0.22	0.27	0.30	0.15	0.03	0.65
23	28	0.63	0.46	1.00	-0.12	-0.29	0.13	-0.13	-0.01	0.19	0.21	0.29	0.16	0.05	0.64
24	29	0.66	0.45	1.00	-0.17	-0.21	0.12	-0.10	0.03	0.17	0.22	0.23	0.14	0.05	0.64
25	30	0.74	0.21	1.00	-0.19	-0.28	0.12	-0.12	0.00	0.17	0.28	0.21	0.21	0.04	0.70
26	32	0.87	0.34	1.00	-0.13	-0.38	0.01	-0.11	-0.02	0.21	0.10	0.43	0.00	-0.09	0.69
27	33	0.78	0.43	1.00	-0.08	-0.21	0.12	-0.13	0.02	0.19	0.25	0.22	0.15	0.06	0.66
28	34	0.75	0.39	1.00	-0.18	-0.22	0.04	-0.08	0.04	0.19	0.22	0.25	0.16	0.06	0.64
29	35	0.79	0.33	1.00	0.04	-0.33	0.28	-0.16	0.11	0.04	0.22	0.26	0.12	-0.06	0.65
30	37	0.54	0.44	1.00	0.19	-0.12	0.19	-0.16	0.05	0.15	0.19	0.28	0.18	0.03	0.68
31	38	0.11	0.29	1.00	0.24	-0.14	0.27	-0.19	0.08	0.00	0.26	0.27	0.14	-0.08	0.68
32	39	0.18	0.18	1.00	0.07	-0.14	0.21	-0.15	0.05	0.02	0.29	0.27	0.11	-0.05	0.67
33	40	0.13	0.46	1.00	0.41	-0.01	0.23	-0.14	0.11	0.00	0.29	0.28	0.08	-0.07	0.69
34	41	0.74	0.33	1.00	0.00	-0.06	0.21	-0.11	0.18	0.06	0.17	0.27	0.07	-0.12	0.70
35	43	0.23	0.20	1.00	-0.02	-0.06	0.25	-0.14	0.13	0.03	0.21	0.38	0.22	-0.16	0.63

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
36	44	0.48	0.45	1.00	0.22	0.06	0.26	-0.07	0.35	-0.01	0.10	0.28	0.04	-0.06	0.69
37	45	0.67	0.35	1.00	-0.07	0.08	0.26	-0.19	0.08	-0.03	0.29	0.26	0.10	-0.08	0.78
38	46	0.31	0.56	1.00	0.37	-0.02	0.26	-0.02	0.25	-0.02	0.13	0.29	0.16	-0.02	0.77
39	48	0.57	0.35	1.00	-0.04	-0.07	0.13	-0.09	0.05	0.06	0.28	0.21	0.11	-0.13	0.74
40	49	0.47	0.40	1.00	0.06	0.01	0.29	-0.16	0.14	-0.04	0.30	0.27	0.16	-0.13	0.79
41	50	0.06	0.37	1.00	0.28	0.02	0.27	-0.10	0.21	-0.10	0.29	0.22	0.09	-0.12	0.75
42	51	0.37	0.46	1.00	0.20	0.07	0.06	0.02	0.23	0.07	0.15	0.16	0.15	-0.05	0.75
43	52	0.25	0.41	1.00	0.15	-0.14	0.29	-0.08	0.27	0.00	-0.06	0.14	0.19	-0.18	0.77
44	54	0.42	0.36	1.00	-0.05	0.09	0.29	-0.12	0.27	-0.02	0.17	0.24	0.10	-0.12	0.83
45	55	0.29	0.42	1.00	0.06	-0.06	-0.01	-0.07	0.10	0.34	0.22	0.61	0.01	-0.01	0.52
46	56	0.28	0.29	1.00	0.07	-0.26	0.23	-0.12	0.30	0.02	-0.10	0.28	0.06	-0.07	0.62
47	57	0.17	0.33	1.00	0.05	0.04	0.37	-0.25	0.10	-0.20	0.21	0.13	0.14	-0.17	0.89
48	59	0.23	0.41	1.00	-0.07	-0.04	0.55	-0.33	0.00	-0.17	0.24	-0.01	0.16	-0.13	0.79
49	60	0.15	0.18	1.00	-0.07	0.02	0.26	-0.34	-0.05	0.00	0.37	0.18	0.08	0.08	0.68
50	61	0.26	0.22	1.00	-0.28	0.12	0.33	-0.27	0.02	-0.08	0.22	-0.13	0.05	-0.10	0.83
51	62	0.25	0.18	1.00	-0.18	-0.18	0.32	-0.29	0.00	-0.10	0.15	-0.02	0.07	-0.17	0.74
52	63	0.22	0.02	1.00	-0.23	-0.46	0.12	-0.22	-0.02	-0.15	-0.06	-0.09	0.08	-0.16	0.59
53	65	0.33	0.34	1.00	-0.12	0.10	0.32	-0.46	-0.12	0.23	0.20	0.13	0.07	-0.04	0.87
54	66	0.15	0.31	1.00	0.05	-0.05	0.16	-0.24	-0.06	-0.04	0.13	0.02	0.09	-0.03	0.86
55	67	0.25	0.21	1.00	-0.02	-0.09	0.38	-0.36	0.00	0.02	0.32	0.18	0.17	-0.15	0.73
56	68	0.63	0.07	1.00	-0.49	0.07	0.16	-0.15	-0.14	0.20	0.15	-0.01	0.51	-0.10	0.90
57	70	0.46	0.35	1.00	-0.07	0.07	0.40	-0.37	0.00	-0.06	0.31	0.04	0.16	-0.13	0.94
58	71	0.53	0.43	1.00	-0.03	0.32	0.20	-0.23	-0.11	0.14	0.14	-0.05	0.10	0.22	0.91
59	72	0.12	0.44	1.00	0.30	0.30	0.16	-0.17	-0.04	0.19	0.16	0.13	0.46	0.12	0.96
60	73	0.47	0.25	1.00	-0.26	0.13	0.09	-0.19	0.08	0.16	0.38	0.01	0.06	-0.03	0.95
61	74	0.21	0.41	1.00	0.14	-0.03	0.43	-0.48	-0.01	-0.18	0.28	0.03	0.01	-0.11	0.94

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
62	76	0.09	0.44	1.00	0.19	0.08	-0.06	-0.13	-0.16	0.23	0.05	0.06	0.43	0.00	0.87
63	77	0.44	0.43	1.00	-0.12	0.09	0.09	-0.15	0.00	0.21	0.17	0.09	0.36	-0.01	0.93
64	78	0.57	0.57	1.00	-0.06	0.13	0.17	-0.30	-0.15	0.16	0.23	0.06	0.20	0.02	0.96
65	79	0.41	0.35	1.00	-0.26	-0.02	0.27	-0.30	-0.01	0.08	0.13	0.10	0.36	-0.08	0.91
66	80	0.48	0.32	1.00	-0.13	-0.04	0.32	-0.38	-0.01	0.04	0.33	0.09	0.04	-0.14	0.96
67	82	0.41	0.25	1.00	-0.10	-0.05	0.39	-0.40	0.02	-0.03	0.43	0.00	0.03	-0.14	0.97
68	83	0.26	0.37	1.00	0.12	0.06	0.17	-0.22	-0.04	0.21	0.16	0.15	0.38	0.04	0.94
69	84	0.30	0.40	1.00	0.06	0.04	0.10	-0.13	0.06	0.21	0.15	0.16	0.31	0.02	0.92
70	85	0.20	0.44	1.00	0.18	0.06	0.25	-0.24	-0.07	0.13	0.14	0.11	0.41	-0.08	0.98
71	87	0.17	0.15	1.00	-0.04	0.00	0.19	-0.33	-0.17	0.24	0.21	0.26	0.36	-0.07	0.97
72	88	0.35	0.45	1.00	-0.04	0.03	0.26	-0.25	-0.05	0.15	0.10	0.12	0.37	-0.07	0.97
73	89	0.42	0.14	1.00	-0.19	-0.38	0.26	-0.40	-0.16	0.03	0.15	0.20	0.50	-0.45	0.98
74	90	0.52	0.23	1.00	-0.21	0.04	0.25	-0.28	-0.13	0.12	0.14	0.14	0.35	-0.07	0.99
75	91	0.38	0.46	1.00	-0.01	0.08	0.35	-0.35	0.02	0.28	0.15	0.27	0.25	0.10	0.93
76	93	0.43	0.37	1.00	-0.05	-0.21	0.39	-0.34	-0.10	-0.05	0.08	0.19	0.32	-0.27	0.99
77	94	0.17	0.46	1.00	-0.05	0.06	0.14	-0.13	-0.05	0.35	0.28	0.17	0.30	0.06	0.98
78	95	0.28	0.16	1.00	-0.03	-0.07	0.26	-0.29	-0.09	0.11	0.09	0.20	0.33	-0.13	0.98
79	96	0.28	0.54	1.00	0.23	-0.16	0.13	-0.19	-0.13	0.13	0.02	0.09	0.28	-0.21	0.98
80	98	0.34	0.33	1.00	0.09	0.20	0.24	-0.37	-0.19	0.19	0.19	0.18	0.34	0.16	0.98
Classical diet															
15	18	0.46	0.52	1.00	0.21	-0.03	-0.08	0.18	0.04	-0.02	0.22	0.09	-0.03	-0.13	0.64
16	20	0.15	0.42	1.00	0.26	-0.16	0.03	0.17	0.04	-0.04	0.30	0.10	-0.16	-0.09	0.58
17	21	0.31	0.37	1.00	0.11	0.06	0.02	0.19	0.03	-0.04	0.22	0.22	-0.13	-0.21	0.62
18	22	0.31	0.15	1.00	-0.17	-0.09	0.01	0.15	0.15	-0.09	0.22	-0.07	0.01	-0.36	0.72
19	23	0.61	0.19	1.00	-0.27	-0.15	0.02	0.14	0.05	-0.05	0.27	0.08	0.04	-0.24	0.69
20	24	0.75	0.45	1.00	-0.31	-0.24	-0.07	0.15	-0.08	0.02	0.03	0.16	0.00	-0.11	0.63

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
21	26	0.70	0.17	1.00	-0.45	-0.25	-0.12	0.18	-0.08	0.07	0.18	0.25	-0.03	-0.07	0.69
22	27	0.64	0.48	1.00	-0.44	-0.14	-0.25	0.20	0.03	0.20	0.16	0.22	0.03	-0.15	0.74
23	28	0.50	0.16	1.00	-0.27	-0.51	-0.08	0.10	-0.02	0.11	0.12	0.02	0.15	-0.32	0.73
24	29	0.73	0.14	1.00	-0.64	-0.35	-0.14	0.11	0.04	0.07	0.15	0.15	0.08	-0.34	0.73
25	30	0.54	0.08	1.00	-0.45	-0.35	-0.15	0.12	0.07	0.01	0.10	0.14	0.11	-0.30	0.73
26	32	0.72	0.09	1.00	-0.57	-0.57	-0.13	0.22	0.18	0.02	0.15	0.03	0.16	-0.30	0.77
27	33	0.75	0.21	1.00	-0.56	-0.63	-0.10	0.21	0.04	-0.04	0.07	0.18	0.12	-0.29	0.77
28	34	0.69	0.30	1.00	-0.31	-0.64	-0.12	0.26	-0.03	-0.05	-0.07	0.32	0.11	-0.36	0.79
29	35	0.73	0.21	1.00	-0.31	-0.62	-0.09	0.26	0.00	-0.03	0.01	0.18	0.15	-0.29	0.79
30	37	0.82	0.45	1.00	-0.21	-0.57	-0.16	0.15	-0.06	0.05	0.06	0.16	0.15	-0.16	0.82
31	38	0.75	0.46	1.00	-0.12	-0.51	-0.13	0.15	-0.07	0.04	0.06	0.16	0.13	-0.16	0.81
32	39	0.65	0.33	1.00	-0.07	-0.60	0.01	0.09	-0.05	-0.09	0.04	0.29	0.06	-0.27	0.83
33	40	0.53	0.40	1.00	0.06	-0.61	0.00	0.09	-0.03	-0.11	0.02	0.23	0.08	-0.28	0.83
34	41	0.56	0.44	1.00	0.04	-0.49	-0.10	0.14	-0.05	-0.02	0.01	0.18	0.11	-0.23	0.84
35	43	0.38	0.30	1.00	0.11	-0.36	-0.04	0.10	-0.08	-0.03	0.03	0.27	0.06	-0.18	0.82
36	44	0.52	0.08	1.00	-0.22	-0.39	-0.10	0.16	-0.06	-0.02	0.04	0.26	0.06	-0.25	0.84
37	45	0.53	0.10	1.00	-0.14	-0.42	0.12	-0.05	0.04	-0.19	0.10	0.21	0.10	-0.29	0.89
38	46	0.33	0.13	1.00	-0.09	-0.42	0.09	-0.04	0.02	-0.16	0.04	0.21	0.09	-0.27	0.87
39	48	0.41	-0.12	1.00	-0.29	-0.39	0.11	-0.01	0.12	-0.14	0.16	0.14	0.05	-0.27	0.88
40	49	0.36	0.29	1.00	0.14	-0.38	0.09	-0.01	0.04	-0.17	0.08	0.20	0.07	-0.30	0.87
41	50	0.66	0.07	1.00	-0.22	-0.37	0.09	0.01	0.07	-0.15	0.19	0.08	0.11	-0.33	0.86
42	51	0.00	-0.03	1.00	-0.12	-0.23	0.12	-0.06	0.07	-0.17	0.18	0.15	0.10	-0.33	0.87
43	52	0.45	0.16	1.00	-0.21	-0.18	0.16	-0.11	0.08	-0.17	0.22	0.08	0.09	-0.22	0.87
44	54	0.48	0.47	1.00	0.15	-0.39	0.15	-0.12	0.07	-0.20	0.12	0.12	0.16	-0.28	0.91
45	55	0.34	0.14	1.00	-0.06	-0.21	0.12	-0.08	0.06	-0.14	0.14	0.16	0.08	-0.24	0.90
46	56	0.11	0.50	1.00	0.23	-0.14	0.08	-0.17	0.05	-0.11	0.13	0.25	0.04	-0.02	0.81

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
47	57	0.35	0.25	1.00	0.06	-0.15	0.08	-0.04	0.17	-0.11	0.30	0.04	0.03	-0.27	0.89
48	59	0.60	0.38	1.00	-0.23	-0.16	0.05	-0.18	0.05	-0.08	0.13	0.09	0.15	-0.15	0.89
49	60	0.41	0.13	1.00	-0.14	-0.13	0.06	0.03	0.19	-0.08	0.32	0.01	0.09	-0.27	0.90
50	61	0.60	0.06	1.00	-0.46	-0.36	0.14	-0.19	0.00	-0.16	0.19	0.04	0.18	-0.34	0.92
51	62	0.55	0.05	1.00	-0.33	-0.26	0.17	-0.13	0.08	-0.18	0.19	0.10	0.14	-0.28	0.89
52	63	0.36	-0.10	1.00	-0.32	-0.36	0.22	-0.20	0.08	-0.28	0.17	0.10	0.10	-0.40	0.91
53	65	0.56	0.10	1.00	-0.35	-0.35	0.13	-0.15	0.07	-0.21	0.20	0.06	0.14	-0.30	0.90
54	66	0.46	-0.06	1.00	-0.29	-0.34	0.08	-0.04	0.11	-0.11	0.27	-0.01	0.13	-0.33	0.94
55	67	0.26	0.08	1.00	-0.12	-0.37	0.18	-0.14	0.16	-0.22	0.22	-0.02	0.12	-0.24	0.88
56	68	0.50	-0.14	1.00	-0.46	-0.38	0.20	-0.12	0.19	-0.19	0.31	0.00	0.12	-0.33	0.92
57	70	0.40	0.24	1.00	-0.21	-0.32	0.12	-0.13	0.06	-0.14	0.22	0.04	0.19	-0.30	0.94
58	71	0.47	0.30	1.00	-0.04	-0.29	0.15	-0.16	0.02	-0.14	0.20	0.05	0.19	-0.29	0.93
59	72	0.31	0.32	1.00	0.01	-0.40	0.18	-0.17	0.08	-0.24	0.23	0.06	0.17	-0.37	0.93
60	73	0.31	-0.18	1.00	-0.32	-0.39	0.17	-0.16	0.09	-0.19	0.17	0.08	0.18	-0.35	0.92
61	74	0.30	0.21	1.00	-0.10	-0.32	0.07	-0.08	0.06	-0.12	0.20	0.12	0.10	-0.31	0.95
62	76	0.48	0.01	1.00	-0.37	-0.28	0.07	-0.07	0.09	-0.07	0.19	0.04	0.10	-0.27	0.95
63	77	0.59	0.29	1.00	-0.23	-0.25	0.06	-0.11	0.05	-0.09	0.22	0.13	0.09	-0.19	0.96
64	78	0.62	0.27	1.00	-0.21	-0.25	0.10	-0.14	0.06	-0.12	0.20	0.11	0.12	-0.21	0.96
65	79	0.33	0.03	1.00	-0.24	-0.37	0.12	-0.13	0.09	-0.15	0.20	0.13	0.09	-0.32	0.96
66	80	-0.19	-0.06	1.00	0.12	-0.36	0.11	-0.16	0.06	-0.14	0.22	0.08	0.13	-0.31	0.96
67	82	0.07	-0.03	1.00	0.07	-0.32	0.08	-0.13	0.05	-0.12	0.24	0.07	0.11	-0.27	0.96
68	83	0.24	0.10	1.00	-0.07	-0.28	0.08	-0.15	0.02	-0.12	0.24	0.06	0.14	-0.25	0.97
69	84	0.00	0.14	1.00	0.22	-0.31	0.06	-0.22	-0.04	-0.08	0.21	0.08	0.05	-0.27	0.96
70	85	0.61	0.39	1.00	-0.19	-0.34	0.09	-0.20	0.13	-0.11	0.47	0.03	0.10	-0.16	0.98
71	87	0.58	0.13	1.00	-0.42	-0.14	0.13	-0.16	0.14	-0.07	0.25	-0.01	0.03	-0.06	0.95
72	88	0.21	0.34	1.00	0.15	0.10	-0.01	0.01	0.06	0.11	0.50	0.16	0.01	0.15	0.96

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
73	89	0.06	0.70	1.00	0.43	-0.05	-0.13	0.12	-0.02	0.08	0.18	0.24	-0.13	0.14	0.98
74	90	0.55	0.08	1.00	-0.28	-0.36	0.13	-0.31	-0.03	-0.17	0.08	0.12	0.09	-0.26	0.99
75	91	0.22	0.21	1.00	0.02	-0.04	-0.11	-0.10	-0.16	0.14	0.49	0.11	0.18	0.00	0.99
76	93	-0.03	0.32	1.00	0.35	-0.41	0.04	-0.13	0.02	-0.06	0.19	0.11	0.12	-0.36	0.98
77	94	0.40	0.36	1.00	-0.13	-0.29	0.07	-0.19	0.04	-0.06	0.18	0.09	0.07	-0.25	0.99
78	95	0.40	0.41	1.00	-0.03	-0.47	0.07	0.00	0.21	-0.11	0.14	0.06	0.02	-0.46	0.98
79	96	0.26	0.30	1.00	0.14	-0.14	0.08	-0.13	0.14	-0.13	-0.01	0.14	0.10	-0.11	0.98
80	98	-0.05	0.02	1.00	0.00	-0.37	0.11	-0.02	0.25	-0.15	0.10	0.05	0.03	-0.29	0.93

Supplementary table 4.9. Correlations between cumulative feed conversion ratio (DCFCR) and daily measure of weight gain (ADG), feed intake (ADFI), body weight (BW), and feed conversion ratio (DFCR), carcass composition (thigh yield TY, breast yield BMY, abdominal fat yield AFY) and meat quality (breast luminance L, redness a*, yellowness b* and ultimate pH pHu), in Label Rouge chickens. CFCRf stands for final cumulative feed conversion ratio.

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
15	18	0.01	0.39	0.05	0.45	1.00	-0.22	-0.05	0.06	0.22	0.36	0.14	-0.19	0.28	-0.08
16	20	-0.01	0.39	-0.13	0.33	1.00	-0.37	0.31	0.14	0.23	0.10	-0.13	-0.32	0.33	-0.19
17	21	0.04	0.46	0.02	0.34	1.00	-0.34	0.15	0.06	0.21	0.07	-0.15	-0.37	0.30	-0.03
18	22	-0.38	-0.09	-0.16	0.33	1.00	-0.30	0.22	0.11	-0.15	0.12	-0.06	-0.37	0.16	-0.23
19	23	-0.26	0.43	-0.20	0.60	1.00	-0.36	0.13	0.09	0.03	0.21	0.01	-0.38	0.37	-0.24
20	24	-0.18	0.14	-0.08	0.31	1.00	-0.11	-0.02	0.17	-0.11	0.06	0.11	-0.42	0.03	-0.14
21	26	-0.32	0.09	-0.20	0.41	1.00	-0.03	-0.19	0.04	-0.13	0.10	0.16	-0.40	0.12	-0.18
22	27	-0.17	0.13	-0.28	0.36	1.00	0.01	-0.13	0.14	-0.06	-0.09	-0.09	-0.33	0.23	-0.20
23	28	-0.14	0.37	-0.29	0.54	1.00	0.03	-0.16	0.07	-0.04	0.02	-0.14	-0.34	0.19	-0.15
24	29	-0.37	0.29	-0.21	0.58	1.00	0.10	-0.20	0.06	-0.15	0.10	0.12	-0.41	0.14	-0.15
25	30	-0.23	0.56	-0.28	0.60	1.00	0.11	-0.08	0.12	-0.15	-0.09	0.10	-0.41	0.14	-0.23
26	32	-0.48	0.43	-0.38	0.66	1.00	0.17	-0.12	0.08	-0.03	0.10	-0.44	-0.13	0.43	-0.21
27	33	-0.28	0.59	-0.21	0.73	1.00	0.06	-0.14	0.01	-0.09	0.05	0.06	-0.40	0.21	-0.12
28	34	-0.08	0.51	-0.22	0.66	1.00	0.05	-0.14	0.04	-0.08	0.09	-0.02	-0.43	0.20	-0.06
29	35	-0.26	0.55	-0.33	0.68	1.00	0.13	-0.14	-0.04	-0.17	0.02	0.01	-0.52	0.25	-0.19
30	37	-0.09	0.56	-0.12	0.68	1.00	-0.08	-0.08	-0.12	0.21	0.10	-0.37	-0.29	0.42	0.01
31	38	0.28	0.68	-0.14	0.51	1.00	0.08	-0.13	0.00	-0.05	0.12	0.01	-0.48	0.31	-0.06
32	39	-0.16	0.61	-0.14	0.60	1.00	0.13	-0.12	0.05	-0.08	0.08	-0.03	-0.43	0.29	-0.03
33	40	0.08	0.59	-0.01	0.51	1.00	0.13	-0.13	0.05	-0.07	0.12	-0.02	-0.42	0.32	0.02
34	41	-0.15	0.69	-0.06	0.75	1.00	0.13	-0.12	0.06	-0.10	0.19	-0.01	-0.41	0.38	0.02
35	43	0.60	0.64	-0.06	0.29	1.00	0.03	-0.18	-0.02	-0.01	0.19	0.03	-0.48	0.35	0.09

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
36	44	0.03	0.61	0.06	0.61	1.00	-0.08	-0.16	-0.06	0.15	0.13	-0.17	-0.35	0.50	0.21
37	45	0.04	0.75	0.08	0.67	1.00	0.04	-0.03	0.11	0.19	0.15	-0.33	-0.35	0.60	0.07
38	46	-0.04	0.33	-0.02	0.35	1.00	-0.07	-0.15	-0.10	0.21	0.08	-0.06	-0.21	0.50	0.15
39	48	-0.17	0.55	-0.07	0.61	1.00	0.09	-0.06	0.06	0.15	0.04	-0.44	-0.36	0.58	0.05
40	49	-0.02	0.77	0.01	0.73	1.00	0.02	-0.15	-0.01	0.13	0.04	-0.32	-0.37	0.65	0.22
41	50	-0.10	0.64	0.02	0.63	1.00	0.08	-0.07	0.10	0.14	0.12	-0.29	-0.36	0.66	0.09
42	51	0.26	0.74	0.07	0.61	1.00	-0.11	0.05	0.01	0.31	0.19	-0.31	-0.24	0.66	0.16
43	52	-0.06	0.67	-0.14	0.53	1.00	-0.02	0.03	0.18	0.11	0.29	-0.24	-0.34	0.73	-0.01
44	54	0.05	0.45	0.09	0.34	1.00	0.04	-0.11	0.06	0.03	0.12	-0.25	-0.35	0.63	0.24
45	55	0.16	0.69	-0.06	0.41	1.00	0.26	-0.07	0.14	-0.04	0.24	-0.39	-0.20	0.48	0.27
46	56	0.07	0.65	-0.26	0.52	1.00	0.11	-0.04	-0.02	0.06	0.38	-0.27	-0.21	0.49	0.17
47	57	0.13	0.76	0.04	0.10	1.00	0.11	0.01	0.16	0.18	0.23	-0.41	-0.24	0.64	0.11
48	59	0.01	0.56	-0.04	0.22	1.00	-0.06	0.10	0.24	0.15	0.24	-0.20	-0.30	0.63	0.09
49	60	-0.02	0.81	0.02	0.57	1.00	0.05	0.11	0.32	0.11	0.18	-0.03	-0.26	0.36	0.19
50	61	-0.08	0.70	0.12	0.33	1.00	-0.05	0.02	0.26	0.07	0.10	-0.03	-0.33	0.60	0.31
51	62	0.14	0.75	-0.18	0.31	1.00	0.10	-0.11	0.09	0.06	0.19	0.00	-0.19	0.73	0.25
52	63	-0.19	0.66	-0.46	0.53	1.00	0.13	0.13	0.19	0.06	0.26	-0.05	-0.31	0.48	0.08
53	65	0.26	0.46	0.10	0.03	1.00	0.18	0.16	0.28	0.01	0.45	0.06	-0.17	0.52	0.22
54	66	0.36	0.41	-0.05	0.02	1.00	0.09	0.02	0.10	0.11	0.27	-0.09	-0.43	0.61	0.08
55	67	0.02	0.41	-0.09	0.13	1.00	-0.05	0.14	0.20	0.19	0.17	-0.02	-0.37	0.67	0.08
56	68	-0.02	0.40	0.07	0.18	1.00	-0.33	0.40	0.08	0.46	0.16	-0.32	-0.06	0.74	-0.09
57	70	0.12	0.56	0.07	0.22	1.00	-0.04	0.08	0.21	0.12	0.10	-0.08	-0.39	0.76	0.14
58	71	0.19	0.57	0.32	0.37	1.00	-0.18	0.13	0.09	0.32	0.26	-0.15	0.04	0.74	0.33
59	72	-0.08	0.59	0.30	0.51	1.00	-0.24	0.25	0.06	0.47	0.05	-0.14	-0.05	0.83	0.23
60	73	-0.18	0.47	0.13	0.45	1.00	-0.22	0.29	0.14	0.38	0.19	-0.28	-0.18	0.85	0.11
61	74	-0.12	0.35	-0.03	0.31	1.00	-0.04	0.22	0.20	0.21	0.14	-0.21	-0.34	0.82	0.01

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
62	76	-0.28	0.23	0.08	0.40	1.00	-0.27	0.38	0.05	0.44	0.19	-0.31	-0.11	0.82	0.08
63	77	0.15	0.49	0.09	0.20	1.00	-0.17	0.30	0.14	0.40	0.07	-0.09	-0.09	0.85	0.02
64	78	-0.01	0.41	0.13	0.27	1.00	-0.13	0.19	0.16	0.35	0.17	-0.24	-0.19	0.86	0.12
65	79	-0.21	0.31	-0.02	0.31	1.00	-0.22	0.27	0.04	0.43	0.11	-0.18	-0.06	0.91	0.04
66	80	0.19	0.41	-0.04	0.09	1.00	0.03	0.17	0.14	0.14	0.13	-0.28	-0.29	0.88	-0.01
67	82	0.05	0.52	-0.05	0.21	1.00	-0.11	0.18	0.13	0.19	0.01	-0.20	-0.32	0.92	0.01
68	83	0.01	0.54	0.06	0.43	1.00	-0.21	0.33	0.10	0.39	0.06	-0.23	-0.05	0.90	-0.03
69	84	0.22	0.52	0.04	0.16	1.00	-0.16	0.29	0.11	0.37	0.04	-0.26	-0.08	0.86	0.02
70	85	-0.25	0.52	0.06	0.47	1.00	-0.18	0.25	0.11	0.40	0.08	-0.31	-0.02	0.93	0.01
71	87	-0.10	0.37	0.00	0.27	1.00	-0.19	0.27	0.05	0.43	0.05	-0.23	-0.03	0.93	-0.04
72	88	0.02	0.50	0.03	0.26	1.00	-0.21	0.25	0.08	0.42	0.03	-0.20	-0.05	0.95	0.00
73	89	-0.17	0.40	-0.38	0.31	1.00	0.05	0.27	0.27	0.24	0.01	-0.22	-0.35	0.93	-0.37
74	90	-0.10	0.50	0.04	0.43	1.00	-0.22	0.23	0.07	0.46	0.01	-0.18	0.00	0.96	0.00
75	91	-0.10	0.39	0.08	0.25	1.00	0.00	0.07	0.25	-0.09	0.03	-0.16	-0.02	0.91	0.08
76	93	-0.13	0.51	-0.21	0.40	1.00	-0.26	0.24	0.20	0.37	0.10	-0.21	-0.13	0.98	-0.20
77	94	-0.15	0.53	0.06	0.40	1.00	-0.25	0.15	0.10	0.36	0.00	-0.24	0.15	0.98	0.07
78	95	0.23	0.56	-0.07	0.29	1.00	-0.29	0.24	0.12	0.47	0.07	-0.23	0.00	0.98	-0.09
79	96	-0.16	0.33	-0.16	0.29	1.00	-0.36	0.29	0.08	0.49	0.01	-0.27	0.00	0.98	-0.16
80	98	-0.14	0.45	0.20	0.43	1.00	-0.25	0.28	0.09	0.40	-0.06	-0.02	0.24	0.98	0.16
Classical diet															
15	18	-0.19	0.47	-0.03	0.69	1.00	-0.12	0.24	0.20	0.25	0.28	0.06	-0.21	0.52	-0.20
16	20	-0.49	0.27	-0.16	0.47	1.00	-0.32	0.32	-0.04	0.32	0.04	0.29	-0.24	0.39	-0.30
17	21	-0.30	0.56	0.06	0.68	1.00	-0.38	0.36	-0.15	0.35	0.06	0.38	-0.26	0.39	-0.16
18	22	-0.44	0.36	-0.09	0.78	1.00	-0.27	0.36	0.05	0.33	0.16	0.31	-0.29	0.46	-0.19
19	23	-0.27	0.35	-0.15	0.53	1.00	-0.32	0.34	-0.17	0.31	-0.11	0.58	-0.43	0.54	-0.29
20	24	-0.08	0.22	-0.24	0.27	1.00	0.23	0.07	0.21	-0.10	0.21	0.30	-0.21	0.38	-0.27

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
21	26	-0.10	0.53	-0.25	0.44	1.00	0.18	0.02	0.09	-0.05	0.05	0.25	-0.17	0.30	-0.39
22	27	-0.21	0.21	-0.14	0.41	1.00	0.08	0.06	0.22	-0.03	0.26	-0.01	-0.12	0.31	-0.22
23	28	-0.43	0.37	-0.51	0.60	1.00	0.24	0.06	0.19	-0.06	0.20	0.30	-0.39	0.58	-0.45
24	29	-0.28	0.44	-0.35	0.55	1.00	0.17	0.10	0.26	-0.09	0.23	0.11	-0.22	0.42	-0.17
25	30	-0.08	0.57	-0.35	0.45	1.00	0.22	0.04	0.15	-0.02	0.29	0.31	-0.36	0.52	-0.24
26	32	-0.36	0.38	-0.57	0.49	1.00	0.26	-0.11	0.03	-0.09	0.21	0.33	-0.39	0.53	-0.43
27	33	-0.49	0.26	-0.63	0.62	1.00	0.21	-0.13	0.12	0.01	0.28	0.11	-0.36	0.51	-0.48
28	34	-0.40	0.17	-0.64	0.53	1.00	0.14	-0.07	0.20	0.02	0.37	-0.12	-0.21	0.47	-0.42
29	35	-0.39	0.28	-0.62	0.57	1.00	0.18	-0.10	0.10	0.05	0.25	0.07	-0.34	0.58	-0.50
30	37	-0.41	0.02	-0.57	0.36	1.00	0.24	-0.03	0.13	0.01	0.22	0.14	-0.39	0.55	-0.52
31	38	-0.42	0.20	-0.51	0.51	1.00	0.19	0.00	0.15	0.03	0.22	0.15	-0.37	0.55	-0.45
32	39	-0.41	0.27	-0.60	0.54	1.00	-0.05	0.11	0.20	0.18	0.25	-0.23	-0.09	0.51	-0.46
33	40	-0.24	0.13	-0.61	0.25	1.00	-0.03	0.09	0.09	0.25	0.21	-0.03	-0.22	0.60	-0.52
34	41	-0.32	0.19	-0.49	0.48	1.00	0.10	0.06	0.14	0.16	0.28	0.07	-0.30	0.62	-0.43
35	43	0.12	0.55	-0.36	0.55	1.00	0.05	0.08	0.20	0.07	0.30	-0.23	-0.16	0.33	-0.25
36	44	-0.01	0.62	-0.39	0.61	1.00	0.07	0.04	0.16	0.10	0.25	-0.25	-0.14	0.40	-0.26
37	45	-0.07	0.54	-0.42	0.59	1.00	-0.35	0.41	-0.08	0.42	0.19	-0.06	-0.22	0.47	-0.32
38	46	0.31	0.60	-0.42	0.36	1.00	-0.34	0.40	-0.06	0.42	0.23	-0.05	-0.21	0.49	-0.33
39	48	-0.08	0.70	-0.39	0.61	1.00	-0.36	0.43	-0.09	0.41	0.18	-0.02	-0.19	0.49	-0.28
40	49	-0.25	0.24	-0.38	0.29	1.00	-0.34	0.38	-0.06	0.43	0.22	-0.07	-0.18	0.56	-0.29
41	50	-0.23	0.71	-0.37	0.77	1.00	-0.34	0.38	-0.07	0.41	0.16	0.03	-0.21	0.57	-0.25
42	51	-0.48	0.13	-0.23	0.47	1.00	-0.28	0.29	-0.01	0.37	0.29	-0.01	-0.19	0.51	-0.13
43	52	-0.01	0.31	-0.18	0.33	1.00	-0.27	0.33	0.07	0.37	0.38	-0.14	-0.27	0.61	-0.17
44	54	0.13	0.10	-0.39	-0.02	1.00	-0.36	0.45	-0.03	0.43	0.24	-0.08	-0.21	0.59	-0.30
45	55	0.22	0.40	-0.21	0.25	1.00	-0.32	0.31	-0.01	0.41	0.31	0.00	-0.19	0.58	-0.15
46	56	-0.16	0.41	-0.14	0.47	1.00	-0.34	0.45	0.02	0.42	0.34	-0.04	-0.12	0.43	-0.11

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
47	57	0.29	0.26	-0.15	-0.02	1.00	-0.28	0.34	-0.02	0.37	0.28	0.08	-0.23	0.64	-0.12
48	59	-0.33	0.42	-0.16	0.56	1.00	-0.29	0.36	-0.08	0.43	0.31	0.06	-0.21	0.58	-0.05
49	60	-0.41	0.53	-0.13	0.63	1.00	-0.33	0.34	-0.02	0.41	0.24	0.16	-0.28	0.75	-0.16
50	61	-0.14	0.59	-0.36	0.39	1.00	-0.28	0.34	0.04	0.32	0.30	0.18	-0.42	0.68	-0.22
51	62	-0.40	0.55	-0.26	0.70	1.00	-0.38	0.33	-0.07	0.44	0.21	0.15	-0.26	0.75	-0.13
52	63	0.07	0.41	-0.36	0.18	1.00	-0.39	0.42	-0.02	0.44	0.26	0.10	-0.30	0.72	-0.24
53	65	-0.37	0.57	-0.35	0.66	1.00	-0.29	0.28	-0.04	0.35	0.23	0.12	-0.36	0.75	-0.26
54	66	-0.15	0.69	-0.34	0.56	1.00	-0.34	0.31	-0.05	0.43	0.19	0.17	-0.27	0.82	-0.22
55	67	-0.23	0.59	-0.37	0.42	1.00	-0.41	0.33	-0.17	0.48	0.16	0.24	-0.23	0.77	-0.15
56	68	-0.09	0.75	-0.38	0.60	1.00	-0.44	0.44	-0.08	0.51	0.18	0.12	-0.19	0.79	-0.23
57	70	-0.09	0.48	-0.32	0.37	1.00	-0.37	0.32	-0.09	0.45	0.15	0.17	-0.29	0.84	-0.22
58	71	-0.29	0.56	-0.29	0.67	1.00	-0.39	0.33	-0.07	0.46	0.18	0.16	-0.28	0.85	-0.18
59	72	0.01	0.24	-0.40	0.18	1.00	-0.38	0.30	-0.10	0.43	0.16	0.12	-0.39	0.82	-0.27
60	73	-0.07	0.65	-0.39	0.38	1.00	-0.36	0.28	-0.14	0.38	0.28	0.05	-0.38	0.78	-0.23
61	74	0.10	0.58	-0.32	0.47	1.00	-0.30	0.23	-0.11	0.34	0.28	0.03	-0.35	0.80	-0.25
62	76	0.14	0.55	-0.28	0.26	1.00	-0.31	0.19	-0.14	0.32	0.19	0.17	-0.37	0.85	-0.22
63	77	-0.21	0.37	-0.25	0.44	1.00	-0.39	0.36	-0.15	0.48	0.22	0.00	-0.08	0.81	-0.22
64	78	-0.30	0.63	-0.25	0.70	1.00	-0.40	0.37	-0.11	0.50	0.24	0.03	-0.12	0.83	-0.22
65	79	0.02	0.34	-0.37	0.25	1.00	-0.38	0.31	-0.14	0.43	0.29	-0.04	-0.25	0.81	-0.31
66	80	0.24	0.63	-0.36	0.34	1.00	-0.33	0.24	-0.13	0.36	0.21	0.05	-0.39	0.87	-0.28
67	82	0.02	0.53	-0.32	0.33	1.00	-0.31	0.21	-0.13	0.35	0.20	0.07	-0.39	0.89	-0.29
68	83	0.37	0.46	-0.28	0.11	1.00	-0.36	0.30	-0.11	0.42	0.26	0.03	-0.31	0.83	-0.27
69	84	0.29	0.41	-0.31	0.12	1.00	-0.32	0.34	0.01	0.37	0.18	0.13	-0.31	0.89	-0.28
70	85	-0.30	0.29	-0.34	0.48	1.00	-0.42	0.61	-0.04	0.44	0.24	0.04	-0.43	0.91	-0.36
71	87	-0.14	0.65	-0.14	0.36	1.00	-0.32	0.17	-0.24	0.38	0.04	0.35	-0.24	0.94	-0.13
72	88	-0.01	0.48	0.10	0.38	1.00	-0.26	0.15	-0.06	0.36	-0.01	0.04	0.17	0.93	0.17

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
73	89	0.23	0.31	-0.05	0.13	1.00	-0.25	-0.10	-0.25	0.22	0.18	-0.06	-0.10	0.90	0.02
74	90	-0.36	0.49	-0.36	0.62	1.00	-0.33	0.30	-0.10	0.42	0.31	0.00	-0.27	0.96	-0.35
75	91	0.00	0.67	-0.04	0.48	1.00	-0.34	0.21	0.01	0.45	0.02	-0.04	-0.05	0.98	-0.08
76	93	0.01	0.41	-0.41	0.29	1.00	-0.34	0.21	-0.15	0.42	0.24	0.00	-0.33	0.97	-0.38
77	94	-0.44	0.51	-0.29	0.62	1.00	-0.27	0.15	-0.23	0.32	0.28	0.07	-0.24	0.97	-0.26
78	95	0.04	0.31	-0.47	0.25	1.00	-0.29	0.15	-0.27	0.34	0.13	0.10	-0.25	0.98	-0.42
79	96	0.28	0.73	-0.14	0.36	1.00	-0.32	0.27	-0.20	0.46	0.31	0.10	-0.05	0.99	-0.06
80	98	0.44	0.44	-0.37	-0.20	1.00	-0.45	0.33	-0.32	0.39	0.16	0.16	-0.25	0.95	-0.23

Supplementary table 4.10. Correlations between feed conversion ratio (DFCR) and daily measure of weight gain (ADG), feed intake (ADFI), body weight (BW), and cumulative feed conversion ratio (DCFCR), carcass composition (thigh yield TY, breast yield BMY, abdominal fat yield AFY) and meat quality (breast luminance L, redness a, yellowness b* and ultimate pH pHu), in Label Rouge chickens. CFCRf stands for final cumulative feed conversion ratio.*

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
15	18	-0.16	0.72	0.01	1.00	0.45	-0.20	0.13	0.11	0.05	0.01	-0.19	-0.29	0.23	-0.04
16	20	-0.58	0.63	-0.01	1.00	0.33	-0.03	0.09	-0.01	-0.10	-0.17	-0.02	-0.32	-0.01	-0.06
17	21	-0.60	0.44	-0.05	1.00	0.34	-0.06	0.19	0.41	-0.25	-0.17	-0.05	-0.01	0.12	-0.11
18	22	-0.19	0.51	-0.14	1.00	0.33	-0.01	-0.16	0.10	0.01	-0.06	0.07	-0.07	0.16	-0.36
19	23	-0.63	0.41	-0.14	1.00	0.60	0.12	-0.15	0.02	-0.16	0.18	0.05	-0.19	0.40	-0.14
20	24	-0.46	0.49	-0.19	1.00	0.31	0.28	-0.35	-0.06	-0.29	-0.16	0.08	-0.25	0.06	-0.18
21	26	-0.57	0.35	-0.37	1.00	0.41	-0.13	-0.16	-0.26	-0.01	0.05	0.02	-0.38	0.13	-0.34
22	27	-0.34	0.47	-0.06	1.00	0.36	0.16	-0.23	-0.07	0.15	-0.06	-0.05	-0.02	0.40	0.03
23	28	-0.40	0.52	-0.12	1.00	0.54	0.40	-0.14	0.13	0.00	-0.03	-0.25	-0.14	0.15	0.02
24	29	-0.59	0.54	-0.17	1.00	0.58	0.21	-0.21	-0.18	-0.06	0.15	-0.26	-0.21	0.06	-0.12
25	30	-0.52	0.82	-0.19	1.00	0.60	0.14	0.10	-0.02	-0.06	-0.26	-0.17	-0.11	0.12	-0.17
26	32	-0.28	0.84	-0.13	1.00	0.66	-0.03	-0.07	-0.07	0.18	0.16	-0.27	-0.21	0.36	-0.04
27	33	-0.37	0.79	-0.08	1.00	0.73	-0.14	-0.14	-0.15	0.08	0.12	0.09	-0.31	0.37	-0.20
28	34	-0.20	0.70	-0.18	1.00	0.66	-0.08	-0.02	-0.10	-0.07	0.20	-0.20	-0.45	0.30	0.16
29	35	-0.04	0.92	0.04	1.00	0.68	0.18	0.03	0.00	-0.02	0.03	-0.11	-0.28	0.33	-0.01
30	37	-0.05	0.87	0.19	1.00	0.68	-0.15	0.00	0.01	0.34	0.16	-0.21	-0.15	0.30	0.15
31	38	-0.30	0.89	0.24	1.00	0.51	0.03	-0.11	-0.05	0.30	0.27	-0.05	-0.13	0.49	0.19
32	39	-0.44	0.90	0.07	1.00	0.60	0.30	0.06	0.20	-0.29	-0.03	-0.14	-0.13	0.30	0.08
33	40	-0.26	0.84	0.41	1.00	0.51	0.01	-0.06	0.13	0.09	0.41	-0.04	-0.25	0.19	0.29
34	41	-0.29	0.90	0.00	1.00	0.75	-0.06	-0.02	0.13	0.04	0.16	-0.04	-0.42	0.52	0.06
35	43	-0.28	0.74	-0.02	1.00	0.29	-0.30	0.06	0.04	0.26	0.22	-0.20	-0.10	0.54	-0.15

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
36	44	-0.12	0.89	0.22	1.00	0.61	-0.16	0.03	0.15	0.33	0.03	-0.03	-0.25	0.44	0.23
37	45	-0.39	0.79	-0.07	1.00	0.67	0.22	-0.02	0.21	-0.23	-0.09	-0.18	-0.25	0.53	-0.06
38	46	-0.37	0.80	0.37	1.00	0.35	0.05	0.01	0.14	0.15	-0.25	0.24	-0.13	0.42	0.28
39	48	-0.39	0.68	-0.04	1.00	0.61	-0.03	-0.10	-0.24	0.06	0.20	-0.38	-0.29	0.50	0.18
40	49	-0.43	0.67	0.06	1.00	0.73	0.10	-0.02	0.21	0.11	-0.24	-0.09	-0.30	0.64	0.16
41	50	-0.48	0.84	0.28	1.00	0.63	-0.01	0.04	0.12	0.02	0.21	-0.18	-0.25	0.51	0.12
42	51	-0.25	0.72	0.20	1.00	0.61	-0.17	0.01	0.03	0.17	0.24	-0.41	-0.18	0.46	0.11
43	52	-0.65	0.73	0.15	1.00	0.53	0.18	0.19	0.26	-0.23	0.04	-0.50	0.04	0.23	0.23
44	54	-0.63	0.58	-0.05	1.00	0.34	0.21	0.11	0.00	-0.25	0.20	-0.11	-0.13	0.11	0.10
45	55	-0.58	0.49	0.06	1.00	0.41	0.07	0.27	0.21	0.28	0.21	-0.09	0.07	0.18	-0.16
46	56	-0.54	0.60	0.07	1.00	0.52	-0.22	0.15	0.24	0.20	0.21	0.33	-0.16	0.29	0.23
47	57	-0.73	0.15	0.05	1.00	0.10	0.08	0.17	0.51	0.22	-0.10	0.18	0.01	0.05	-0.10
48	59	-0.80	0.32	-0.07	1.00	0.22	-0.33	0.36	0.54	0.23	-0.06	0.17	-0.07	0.20	-0.04
49	60	-0.73	0.49	-0.07	1.00	0.57	-0.10	0.22	0.30	0.10	0.29	0.10	-0.23	0.36	-0.07
50	61	-0.83	0.44	-0.28	1.00	0.33	-0.20	0.27	0.11	0.23	0.04	0.26	-0.40	0.29	-0.10
51	62	-0.69	0.40	-0.18	1.00	0.31	-0.12	0.12	-0.06	0.09	0.14	0.36	0.04	0.33	-0.05
52	63	-0.75	0.41	-0.23	1.00	0.53	0.19	-0.15	-0.19	-0.07	0.22	-0.14	-0.02	0.30	0.01
53	65	-0.76	0.56	-0.12	1.00	0.03	-0.34	0.18	-0.01	0.31	-0.06	-0.04	0.23	0.33	-0.09
54	66	-0.66	0.60	0.05	1.00	0.02	-0.03	-0.02	0.21	0.04	-0.48	0.05	-0.22	0.23	-0.07
55	67	-0.79	0.63	-0.02	1.00	0.13	0.06	0.07	0.23	0.09	-0.20	-0.05	-0.04	0.03	0.02
56	68	-0.82	0.31	-0.49	1.00	0.18	-0.22	0.22	0.22	-0.27	-0.06	0.00	-0.37	0.03	-0.43
57	70	-0.57	0.45	-0.07	1.00	0.22	-0.03	0.06	-0.15	0.08	0.06	0.18	-0.05	0.32	-0.10
58	71	-0.45	0.67	-0.03	1.00	0.37	-0.16	0.18	0.11	-0.01	0.29	-0.15	0.02	0.60	-0.09
59	72	-0.60	0.66	0.30	1.00	0.51	-0.17	0.08	-0.12	0.22	0.08	-0.13	-0.05	0.57	0.20
60	73	-0.83	0.50	-0.26	1.00	0.45	-0.20	0.51	0.08	0.06	-0.11	-0.30	-0.20	0.59	-0.39
61	74	-0.65	0.63	0.14	1.00	0.31	0.17	-0.02	0.09	0.02	-0.35	-0.09	-0.04	0.30	0.25

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
62	76	-0.73	0.45	0.19	1.00	0.40	-0.16	0.05	-0.05	0.27	-0.30	-0.19	-0.15	0.55	0.11
63	77	-0.74	0.36	-0.12	1.00	0.20	-0.30	0.17	0.08	0.13	-0.10	-0.07	-0.21	0.43	-0.22
64	78	-0.67	0.38	-0.06	1.00	0.27	-0.06	0.02	0.01	0.11	0.06	-0.02	-0.01	0.35	-0.15
65	79	-0.75	0.30	-0.26	1.00	0.31	-0.48	0.34	-0.02	0.34	0.12	-0.01	-0.12	0.34	-0.25
66	80	-0.70	0.46	-0.13	1.00	0.09	-0.11	-0.09	-0.12	0.32	-0.02	0.09	0.05	0.36	-0.15
67	82	-0.69	0.58	-0.10	1.00	0.21	-0.12	-0.05	0.04	0.16	0.05	0.02	0.04	0.27	-0.14
68	83	-0.63	0.78	0.12	1.00	0.43	-0.17	0.22	0.17	0.18	-0.19	-0.19	0.36	0.47	0.11
69	84	-0.66	0.46	0.06	1.00	0.16	0.24	-0.17	0.04	-0.29	-0.27	-0.29	0.21	-0.05	0.27
70	85	-0.70	0.67	0.18	1.00	0.47	-0.05	0.03	-0.01	0.26	0.23	-0.11	0.24	0.55	0.16
71	87	-0.76	0.47	-0.04	1.00	0.27	-0.13	0.18	0.18	0.16	-0.17	0.00	0.11	0.45	-0.13
72	88	-0.74	0.40	-0.04	1.00	0.26	-0.12	-0.02	-0.02	0.32	-0.23	0.07	0.10	0.36	-0.06
73	89	-0.77	0.43	-0.19	1.00	0.31	-0.32	0.12	0.14	0.26	0.14	0.10	-0.27	0.23	-0.23
74	90	-0.64	0.70	-0.21	1.00	0.43	0.03	-0.13	0.12	0.18	-0.12	0.11	0.00	0.52	-0.21
75	91	-0.73	0.61	-0.01	1.00	0.25	-0.07	-0.32	-0.18	0.35	-0.14	0.15	0.18	0.43	-0.20
76	93	-0.71	0.57	-0.05	1.00	0.40	0.01	-0.01	-0.04	0.24	-0.11	-0.08	0.06	0.42	-0.04
77	94	-0.71	0.47	-0.05	1.00	0.40	0.07	-0.27	-0.30	0.21	-0.35	-0.15	0.15	0.41	0.00
78	95	-0.42	0.57	-0.03	1.00	0.29	-0.13	-0.24	0.06	0.19	-0.31	-0.01	0.00	0.29	-0.06
79	96	-0.69	0.59	0.23	1.00	0.29	-0.26	0.00	-0.08	0.39	0.10	0.11	0.38	0.34	0.23
80	98	-0.71	0.68	0.09	1.00	0.43	-0.25	0.14	-0.11	0.30	0.11	0.18	-0.09	0.54	0.09
Classical diet															
15	18	-0.03	0.74	0.27	1.00	0.54	-0.11	0.26	-0.02	0.15	0.16	0.46	-0.45	0.44	-0.08
16	20	-0.55	0.87	0.27	1.00	0.46	-0.20	0.24	-0.20	0.23	0.23	0.30	-0.36	0.25	-0.13
17	21	-0.30	0.75	0.21	1.00	0.72	-0.24	0.19	-0.19	0.30	0.13	0.21	-0.38	0.44	-0.30
18	22	-0.63	0.35	-0.15	1.00	0.79	-0.09	0.24	0.16	0.12	0.03	0.29	-0.25	0.44	-0.29
19	23	-0.43	0.63	-0.24	1.00	0.55	0.07	0.08	0.11	0.01	-0.29	0.12	-0.16	0.21	-0.37
20	24	-0.58	0.35	-0.28	1.00	0.34	0.30	-0.14	-0.01	-0.03	0.05	0.05	-0.12	0.28	-0.38

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
21	26	-0.69	0.48	-0.43	1.00	0.41	0.20	-0.02	0.15	-0.08	0.25	0.07	-0.25	0.45	-0.44
22	27	-0.56	-0.05	-0.40	1.00	0.48	0.27	-0.03	0.03	-0.01	0.17	0.09	-0.25	0.43	-0.40
23	28	-0.74	0.50	-0.22	1.00	0.62	0.10	-0.04	0.03	0.17	0.21	-0.03	-0.16	0.38	-0.20
24	29	-0.78	0.38	-0.61	1.00	0.60	0.02	-0.13	-0.17	0.11	0.02	0.26	-0.35	0.55	-0.61
25	30	-0.77	0.41	-0.40	1.00	0.51	0.12	-0.30	-0.10	0.10	0.14	-0.03	-0.08	0.30	-0.50
26	32	-0.75	0.39	-0.36	1.00	0.63	0.20	-0.11	0.13	0.00	0.31	-0.16	-0.34	0.37	-0.52
27	33	-0.57	0.42	-0.47	1.00	0.64	0.13	-0.15	-0.05	0.02	-0.05	0.01	-0.19	0.38	-0.53
28	34	-0.38	0.62	-0.30	1.00	0.52	0.03	-0.04	-0.09	0.08	0.21	0.03	-0.10	0.41	-0.32
29	35	-0.32	0.73	-0.30	1.00	0.57	-0.06	-0.01	-0.03	0.21	-0.12	-0.01	-0.16	0.38	-0.22
30	37	-0.45	0.69	-0.18	1.00	0.38	-0.26	0.29	0.00	0.24	-0.31	0.25	-0.35	0.29	-0.39
31	38	-0.38	0.71	-0.08	1.00	0.53	-0.06	0.25	0.12	0.14	0.00	0.02	-0.11	0.14	-0.19
32	39	-0.25	0.81	-0.03	1.00	0.57	-0.30	0.16	-0.02	0.34	0.03	-0.06	-0.03	0.28	0.01
33	40	-0.40	0.84	0.08	1.00	0.29	-0.16	-0.10	-0.34	0.40	-0.19	0.29	-0.29	0.45	-0.06
34	41	-0.13	0.75	0.06	1.00	0.61	0.20	-0.09	-0.05	0.11	0.12	0.11	-0.37	0.46	-0.04
35	43	-0.08	0.92	0.13	1.00	0.56	-0.22	0.01	-0.04	0.28	0.01	0.03	-0.03	0.37	0.09
36	44	-0.28	0.85	-0.19	1.00	0.62	-0.29	0.09	-0.08	0.46	-0.16	-0.34	0.02	0.32	-0.15
37	45	-0.14	0.91	-0.12	1.00	0.60	-0.01	-0.01	0.08	0.18	0.14	-0.33	0.04	0.43	-0.12
38	46	-0.37	0.79	-0.08	1.00	0.38	-0.15	-0.06	-0.06	0.29	0.08	-0.14	0.02	0.53	-0.07
39	48	-0.58	0.84	-0.26	1.00	0.62	-0.25	0.26	0.04	0.34	-0.06	0.16	-0.08	0.65	-0.15
40	49	-0.50	0.93	0.17	1.00	0.33	0.01	-0.14	0.02	0.12	-0.06	-0.05	-0.02	0.41	0.19
41	50	-0.41	0.89	-0.20	1.00	0.78	-0.47	0.34	-0.15	0.50	0.14	0.26	-0.21	0.70	-0.12
42	51	-0.58	0.58	-0.10	1.00	0.50	-0.32	0.33	0.02	0.24	0.07	0.15	-0.33	0.36	-0.20
43	52	-0.30	0.71	-0.21	1.00	0.34	-0.36	0.34	0.10	0.45	0.10	-0.26	-0.15	0.55	-0.28
44	54	-0.21	0.69	0.03	1.00	-0.07	-0.01	0.09	0.05	-0.01	-0.12	0.02	-0.09	0.11	-0.05
45	55	-0.30	0.80	-0.03	1.00	0.30	-0.08	0.04	-0.08	0.23	0.00	0.27	-0.13	0.62	-0.12
46	56	-0.60	0.80	0.18	1.00	0.57	-0.25	0.28	-0.14	0.27	0.11	0.40	-0.24	0.42	0.01

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
47	57	-0.41	0.65	0.03	1.00	0.09	0.07	-0.05	-0.03	0.01	-0.27	0.35	-0.29	0.51	-0.04
48	59	-0.67	0.62	-0.22	1.00	0.60	-0.24	0.02	-0.34	0.37	0.09	0.09	-0.07	0.48	-0.25
49	60	-0.53	0.82	-0.16	1.00	0.64	-0.38	0.23	-0.16	0.34	0.12	0.23	-0.37	0.67	-0.13
50	61	-0.70	0.52	-0.36	1.00	0.51	-0.11	-0.04	-0.09	0.24	-0.19	0.33	-0.26	0.74	-0.42
51	62	-0.65	0.75	-0.30	1.00	0.73	-0.40	0.19	-0.30	0.49	-0.07	0.24	-0.24	0.61	-0.24
52	63	-0.53	0.64	-0.27	1.00	0.37	-0.13	0.00	-0.17	0.36	-0.02	0.03	0.04	0.47	-0.20
53	65	-0.64	0.61	-0.32	1.00	0.70	-0.35	0.29	-0.23	0.44	-0.07	0.30	-0.22	0.53	-0.28
54	66	-0.62	0.77	-0.25	1.00	0.62	-0.36	0.02	-0.43	0.42	-0.07	0.01	-0.09	0.49	-0.24
55	67	-0.72	0.68	-0.08	1.00	0.52	-0.23	0.22	-0.05	0.22	-0.04	0.11	-0.25	0.64	-0.33
56	68	-0.65	0.66	-0.46	1.00	0.62	-0.49	0.27	-0.27	0.56	0.02	0.05	-0.18	0.53	-0.35
57	70	-0.63	0.58	-0.22	1.00	0.45	-0.15	-0.02	-0.04	0.25	-0.20	-0.10	-0.23	0.55	-0.17
58	71	-0.51	0.80	-0.05	1.00	0.71	-0.22	-0.15	-0.30	0.39	0.19	0.07	-0.26	0.67	-0.02
59	72	-0.74	0.78	0.04	1.00	0.37	0.05	-0.30	-0.12	0.07	-0.10	-0.14	0.22	0.28	0.00
60	73	-0.47	0.72	-0.33	1.00	0.54	-0.14	-0.15	-0.27	0.20	-0.07	0.09	-0.23	0.52	-0.19
61	74	-0.27	0.52	-0.12	1.00	0.64	0.01	-0.02	-0.01	-0.02	-0.06	0.23	-0.14	0.57	-0.13
62	76	-0.46	0.63	-0.35	1.00	0.41	-0.05	0.00	-0.01	0.17	-0.18	-0.06	-0.05	0.51	-0.37
63	77	-0.56	0.73	-0.24	1.00	0.56	-0.35	0.22	-0.11	0.31	-0.16	0.11	-0.29	0.66	-0.25
64	78	-0.57	0.72	-0.21	1.00	0.70	-0.37	0.31	-0.13	0.43	-0.07	0.09	-0.10	0.74	-0.21
65	79	-0.49	0.59	-0.25	1.00	0.41	-0.26	-0.04	-0.18	0.30	-0.10	0.07	-0.19	0.64	-0.16
66	80	-0.42	0.75	0.14	1.00	0.44	-0.13	0.04	-0.01	0.19	-0.09	0.27	-0.23	0.54	0.17
67	82	-0.30	0.39	0.07	1.00	0.51	0.08	0.16	0.28	-0.06	0.11	0.22	0.03	0.54	0.13
68	83	-0.35	0.64	-0.06	1.00	0.39	0.00	-0.22	-0.19	0.14	-0.29	0.08	0.05	0.51	-0.09
69	84	-0.43	0.61	0.26	1.00	0.27	-0.05	-0.09	-0.03	0.16	0.07	0.08	0.04	0.44	0.13
70	85	-0.52	0.44	-0.18	1.00	0.53	0.06	0.06	0.17	-0.13	0.16	-0.04	-0.09	0.66	-0.17
71	87	-0.76	0.35	-0.42	1.00	0.36	-0.22	0.28	0.05	0.08	-0.39	0.24	-0.13	0.29	-0.40
72	88	-0.71	0.49	0.10	1.00	0.54	-0.16	0.07	0.01	0.41	0.05	0.01	-0.05	0.71	0.04

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
73	89	-0.53	0.30	0.37	1.00	0.55	-0.29	0.24	0.10	0.27	0.10	0.17	0.19	0.58	0.42
74	90	-0.53	0.72	-0.21	1.00	0.65	-0.07	0.15	0.20	0.30	0.46	-0.27	-0.24	0.72	-0.19
75	91	-0.54	0.69	0.03	1.00	0.53	-0.12	0.03	-0.11	0.28	0.15	0.23	-0.26	0.60	-0.03
76	93	-0.52	0.63	0.35	1.00	0.29	-0.16	-0.08	-0.05	0.39	0.36	-0.30	0.10	0.30	0.34
77	94	-0.56	0.57	-0.06	1.00	0.71	0.14	-0.13	0.00	0.01	0.29	0.05	-0.21	0.78	-0.03
78	95	-0.44	0.57	-0.05	1.00	0.25	0.03	0.23	0.00	-0.02	0.02	0.37	-0.37	0.30	-0.06
79	96	-0.43	0.64	0.14	1.00	0.40	0.14	-0.09	-0.12	0.08	0.00	-0.02	0.19	0.44	0.18
80	98	-0.59	0.32	0.02	1.00	-0.13	0.08	0.04	0.08	-0.09	-0.30	0.27	-0.32	-0.02	-0.06

Supplementary table 4.11. Correlations between daily feed intake and daily measure of weight gain (ADG), body weight (BW), feed conversion ratio (DFCR), cumulative feed conversion ratio (DCFCR), carcass composition (thigh yield TY, breast yield BMY, abdominal fat yield AFY) and meat quality (breast luminance L, redness a*, yellowness b* and ultimate pH pHu), in standard chickens. CF CRf stands for final cumulative feed conversion ratio.

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CF CRf	Slaughter weight
Alternative diet															
5	14	0.02	1.00	0.30	0.81	0.53	-0.52	0.32	-0.62	-0.20	0.22	0.42	-0.11	-0.30	0.17
6	17	0.07	1.00	0.06	0.94	0.79	0.03	-0.39	-0.30	-0.36	-0.20	0.42	-0.07	0.12	0.20
7	20	-0.06	1.00	-0.13	0.91	0.84	-0.21	-0.14	-0.43	0.07	0.17	-0.01	0.19	0.26	-0.03
8	23	0.01	1.00	0.14	0.94	0.67	-0.02	-0.23	-0.21	-0.09	-0.12	0.38	0.24	0.36	0.19
9	26	0.49	1.00	0.37	0.67	0.68	0.19	-0.23	-0.26	-0.30	-0.06	0.32	0.43	0.20	0.52
10	29	0.37	1.00	0.38	0.68	0.72	0.19	-0.23	-0.24	-0.29	-0.09	0.32	0.43	0.21	0.54
11	31	0.16	1.00	0.38	0.77	0.72	0.20	-0.23	-0.22	-0.28	-0.12	0.32	0.44	0.22	0.55
12	34	0.43	1.00	0.32	0.67	0.61	-0.21	0.11	-0.31	-0.41	-0.06	0.22	0.29	0.14	0.41
13	37	0.42	1.00	0.25	0.48	0.75	0.21	-0.22	-0.19	-0.26	-0.17	0.31	0.44	0.24	0.58
14	40	0.61	1.00	0.43	0.24	0.67	0.22	-0.21	-0.17	-0.25	-0.21	0.30	0.44	0.25	0.59
15	43	0.40	1.00	0.30	0.46	0.45	0.30	-0.10	-0.11	-0.09	-0.18	0.24	0.27	0.19	0.30
16	46	0.56	1.00	0.46	0.54	0.62	0.23	-0.20	-0.13	-0.21	-0.27	0.28	0.44	0.27	0.61
17	49	0.31	1.00	0.22	0.82	0.48	0.32	0.03	0.22	-0.05	-0.11	0.14	0.11	0.08	0.36
18	51	0.18	1.00	0.24	0.84	0.38	0.29	-0.19	0.17	-0.17	-0.37	-0.18	0.19	0.17	0.50
19	54	0.64	1.00	0.38	0.80	0.42	0.46	-0.02	0.10	-0.51	-0.14	-0.12	0.33	0.12	0.50
20	57	0.32	1.00	-0.06	0.84	0.54	0.18	-0.13	0.34	-0.14	-0.21	-0.15	0.19	0.20	0.18
21	60	0.00	1.00	-0.02	0.77	0.28	-0.02	-0.20	0.20	0.01	-0.72	0.03	0.19	0.23	0.22
22	63	0.23	1.00	0.21	0.76	0.42	0.07	0.03	-0.02	-0.08	-0.31	-0.15	0.04	0.33	0.33
23	66	0.40	1.00	0.35	0.66	0.23	0.24	-0.06	0.34	-0.13	-0.57	0.03	0.33	0.16	0.54
24	69	0.33	1.00	0.43	0.73	0.15	0.06	-0.15	0.09	-0.34	-0.26	-0.11	0.25	0.07	0.47
25	71	0.39	1.00	0.28	0.61	0.44	-0.07	0.18	-0.04	-0.11	-0.11	-0.12	0.16	0.23	0.36

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
26	74	0.14	1.00	0.10	0.85	0.40	0.31	0.06	0.07	-0.04	-0.40	-0.19	-0.24	0.52	0.24
27	77	0.14	1.00	0.16	0.88	0.31	-0.02	0.01	0.29	-0.09	-0.12	0.04	-0.01	0.31	0.20
28	80	0.30	1.00	-0.04	0.83	0.70	0.24	0.07	0.31	-0.19	-0.29	0.02	0.02	0.82	0.04
29	83	0.15	1.00	0.04	0.81	0.66	0.24	0.07	0.32	-0.19	-0.29	0.02	0.02	0.82	0.03
30	86	0.39	1.00	0.03	0.56	0.70	0.23	0.07	0.32	-0.19	-0.29	0.02	0.01	0.82	0.02
31	89	0.30	1.00	0.27	0.92	0.59	0.23	0.14	0.04	-0.28	-0.03	0.19	0.16	0.61	0.25
32	91	-0.12	1.00	-0.28	0.95	0.68	0.02	0.03	0.22	0.07	-0.46	0.04	-0.12	0.75	-0.33
33	94	0.37	1.00	0.06	0.86	0.46	0.10	0.06	-0.13	-0.04	0.04	0.34	0.15	0.47	0.03
34	97	0.12	1.00	-0.05	0.67	0.67	0.03	0.12	0.06	-0.03	-0.24	0.26	0.00	0.72	-0.14
Classical diet															
5	14	-0.02	1.00	-0.14	0.87	0.75	0.14	-0.14	0.07	-0.09	-0.09	0.09	0.03	0.53	-0.01
6	17	-0.07	1.00	0.04	0.88	0.41	-0.10	0.15	-0.22	0.13	0.42	0.11	0.00	0.30	0.33
7	20	0.13	1.00	-0.09	0.95	0.76	0.21	-0.07	0.05	0.07	0.02	-0.06	0.25	0.09	0.22
8	23	0.20	1.00	-0.05	0.93	0.61	0.16	0.06	-0.06	-0.02	0.25	0.15	-0.01	0.47	0.19
9	26	0.14	1.00	0.12	0.87	0.84	0.29	-0.19	-0.12	0.01	0.08	0.16	0.18	0.61	0.28
10	29	0.23	1.00	0.04	0.91	0.88	0.17	-0.16	-0.12	0.10	0.11	0.26	0.06	0.70	0.16
11	31	0.19	1.00	0.16	0.82	0.87	0.29	-0.20	-0.09	-0.01	0.07	0.18	0.16	0.65	0.25
12	34	0.04	1.00	-0.04	0.92	0.80	0.10	-0.14	0.04	0.10	0.03	0.13	0.02	0.37	0.04
13	37	0.29	1.00	0.22	0.79	0.88	0.28	-0.16	-0.08	-0.01	0.04	0.21	0.18	0.74	0.27
14	40	0.08	1.00	0.14	0.75	0.89	0.28	-0.20	-0.08	-0.01	0.05	0.19	0.12	0.73	0.20
15	43	0.26	1.00	0.28	0.91	0.45	0.00	0.02	-0.16	0.04	0.21	0.12	0.03	0.35	0.17
16	46	0.00	1.00	0.03	0.84	0.88	0.24	-0.19	-0.06	-0.02	0.01	0.16	0.08	0.78	0.11
17	49	0.14	1.00	-0.03	0.88	0.69	0.42	-0.26	0.12	-0.25	0.04	0.14	0.17	0.30	0.13
18	51	-0.17	1.00	-0.27	0.91	0.80	0.11	-0.11	-0.01	-0.14	0.11	0.06	-0.33	0.76	-0.11
19	54	0.48	1.00	0.38	0.69	0.69	0.12	0.21	0.13	-0.02	0.09	0.36	0.16	0.64	0.48
20	57	0.27	1.00	0.27	0.87	0.58	-0.02	0.00	-0.03	0.03	-0.07	0.33	0.18	0.69	0.24

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
21	60	-0.19	1.00	-0.15	0.89	0.80	0.22	-0.14	0.05	-0.14	0.12	0.00	-0.29	0.84	-0.20
22	63	0.30	1.00	0.23	0.90	0.54	0.09	-0.10	-0.11	0.11	-0.16	0.36	0.17	0.58	0.17
23	66	0.25	1.00	0.19	0.74	0.44	-0.14	-0.16	-0.08	0.23	0.12	0.15	-0.10	0.41	0.20
24	69	0.31	1.00	0.38	0.75	0.54	0.07	0.07	0.10	-0.03	0.02	0.41	0.12	0.54	0.34
25	71	0.04	1.00	0.00	0.79	0.57	-0.02	0.13	-0.04	-0.05	0.13	-0.04	-0.01	0.46	0.10
26	74	0.30	1.00	0.06	0.73	0.55	0.06	0.32	0.11	-0.11	0.43	0.20	-0.11	0.57	0.10
27	77	0.16	1.00	0.14	0.79	0.47	0.24	0.06	-0.02	-0.24	0.20	0.06	-0.17	0.48	0.15
28	80	0.09	1.00	0.17	0.73	0.68	-0.01	0.12	-0.15	-0.01	0.18	0.15	-0.18	0.82	0.19
29	83	0.06	1.00	0.32	0.69	0.64	0.00	0.27	-0.10	-0.07	0.16	0.11	-0.08	0.80	0.32
30	86	0.22	1.00	0.11	0.61	0.68	0.06	0.14	-0.05	-0.12	0.14	0.01	-0.18	0.80	0.11
31	89	0.40	1.00	0.13	0.82	0.56	0.03	0.08	-0.16	0.11	0.25	-0.01	-0.06	0.58	0.22
32	91	-0.09	1.00	-0.07	0.85	0.63	0.21	-0.07	0.03	-0.30	0.14	-0.12	-0.08	0.70	-0.10
33	94	0.16	1.00	0.09	0.92	0.49	-0.10	0.09	-0.16	0.09	0.07	0.21	-0.20	0.58	0.03
34	97	-0.10	1.00	-0.05	0.82	0.63	-0.02	0.14	-0.11	-0.01	0.09	0.05	-0.16	0.67	-0.02

Supplementary table 4.12. Correlations between daily weight gain and daily measure of feed intake (ADFI), body weight (BW), feed conversion ratio (DFCR), cumulative feed conversion ratio (DCFCR), carcass composition (thigh yield TY, breast yield BMY, abdominal fat yield AFY) and meat quality (breast luminance L, redness a*, yellowness b* and ultimate pH pHu), in standard chickens. CFRCrf stands for final cumulative feed conversion ratio.

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFRCrf	Slaughter weight
Alternative diet															
5	14	1.00	0.02	0.71	-0.56	-0.42	0.06	0.25	-0.05	-0.40	-0.11	0.11	0.15	-0.31	0.59
6	17	1.00	0.07	0.71	-0.26	-0.17	0.31	0.06	0.04	-0.44	-0.07	0.05	0.27	-0.43	0.76
7	20	1.00	-0.06	0.84	-0.40	-0.30	0.36	-0.10	0.32	-0.54	0.20	0.23	0.33	-0.44	0.65
8	23	1.00	0.01	0.55	-0.32	-0.06	0.23	-0.20	-0.05	-0.08	-0.32	0.02	0.14	-0.27	0.65
9	26	1.00	0.49	0.88	-0.32	0.12	0.31	-0.17	-0.02	-0.32	0.14	0.07	0.37	-0.32	0.63
10	29	1.00	0.37	0.91	-0.43	-0.02	0.12	0.01	-0.21	-0.29	0.13	0.15	0.31	-0.23	0.51
11	31	1.00	0.16	0.78	-0.50	-0.21	0.28	0.03	-0.01	-0.12	0.24	-0.13	0.19	-0.44	0.50
12	34	1.00	0.43	0.85	-0.37	0.01	0.28	-0.18	-0.18	-0.31	0.14	0.21	0.56	-0.39	0.86
13	37	1.00	0.42	0.79	-0.58	-0.02	0.21	-0.18	-0.23	-0.37	0.12	0.24	0.49	-0.26	0.72
14	40	1.00	0.61	0.87	-0.61	0.01	0.25	-0.20	-0.18	-0.30	0.05	0.27	0.50	-0.24	0.83
15	43	1.00	0.40	0.79	-0.59	-0.06	0.20	-0.31	-0.31	-0.24	0.00	0.38	0.57	-0.30	0.83
16	46	1.00	0.56	0.93	-0.39	-0.17	0.24	-0.13	-0.31	-0.20	0.07	0.21	0.53	-0.35	0.89
17	49	1.00	0.31	0.78	-0.27	-0.03	0.33	-0.12	-0.07	-0.45	0.19	-0.20	0.43	-0.50	0.82
18	51	1.00	0.18	0.80	-0.37	-0.24	0.36	-0.18	-0.08	-0.38	0.32	-0.18	0.38	-0.58	0.69
19	54	1.00	0.64	0.80	0.07	0.06	0.40	-0.11	0.04	-0.50	0.11	-0.08	0.43	-0.26	0.75
20	57	1.00	0.32	0.74	-0.24	0.13	0.44	-0.26	0.18	-0.53	-0.08	0.02	0.50	-0.22	0.75
21	60	1.00	0.00	0.68	-0.62	-0.39	0.58	-0.10	0.31	-0.24	-0.04	0.02	0.58	-0.40	0.75
22	63	1.00	0.23	0.78	-0.44	-0.26	0.54	-0.19	0.12	-0.32	-0.01	-0.33	0.53	-0.43	0.82
23	66	1.00	0.40	0.74	-0.42	-0.46	0.33	-0.29	0.24	-0.11	-0.28	0.00	0.74	-0.41	0.78
24	69	1.00	0.33	0.88	-0.40	-0.58	0.31	-0.04	0.12	-0.23	0.09	-0.16	0.68	-0.65	0.88
25	71	1.00	0.39	0.61	-0.49	-0.22	-0.17	0.14	-0.21	-0.25	0.09	-0.18	0.42	-0.48	0.65

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMV	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
26	74	1.00	0.14	0.33	-0.39	-0.03	-0.36	0.30	-0.06	0.20	-0.04	0.11	0.16	-0.04	0.42
27	77	1.00	0.14	0.85	-0.34	-0.58	0.21	0.14	0.23	-0.32	0.03	-0.03	0.47	-0.61	0.92
28	80	1.00	0.30	0.68	-0.28	-0.03	0.23	0.17	0.15	-0.11	-0.08	-0.20	0.38	-0.18	0.85
29	83	1.00	0.15	0.16	-0.46	0.06	0.11	-0.13	0.01	0.23	-0.32	-0.29	0.06	-0.10	0.36
30	86	1.00	0.39	0.54	-0.53	-0.10	0.45	0.15	0.19	-0.19	-0.04	-0.31	0.43	0.01	0.59
31	89	1.00	0.30	0.51	-0.10	0.06	-0.16	0.16	-0.10	0.03	-0.26	0.07	0.36	-0.07	0.55
32	91	1.00	-0.12	0.60	-0.42	-0.26	0.36	0.12	0.26	-0.14	-0.07	0.03	0.32	-0.26	0.65
33	94	1.00	0.37	0.61	-0.14	-0.01	0.28	0.08	0.00	-0.19	0.13	0.15	0.50	-0.07	0.60
34	97	1.00	0.12	0.57	-0.63	-0.18	0.35	-0.24	0.27	-0.04	-0.19	0.24	0.44	-0.21	0.62
Classical diet															
5	14	1.00	-0.02	0.61	-0.50	-0.11	-0.08	0.11	-0.10	0.20	-0.06	0.40	0.58	-0.20	0.73
6	17	1.00	-0.07	0.66	-0.51	-0.27	-0.06	0.02	0.00	0.07	-0.10	0.07	0.58	-0.49	0.70
7	20	1.00	0.13	0.72	-0.18	-0.16	-0.21	0.12	-0.23	0.18	-0.10	0.33	0.48	-0.42	0.73
8	23	1.00	0.20	0.55	-0.15	-0.03	0.17	0.08	-0.10	-0.07	0.06	0.22	0.40	-0.28	0.73
9	26	1.00	0.14	0.63	-0.34	-0.03	0.26	0.02	0.06	-0.22	-0.10	0.26	0.18	-0.11	0.61
10	29	1.00	0.23	0.66	-0.19	0.08	0.37	0.05	0.12	-0.25	-0.17	0.25	0.38	-0.08	0.65
11	31	1.00	0.19	0.83	-0.38	-0.05	0.24	-0.11	0.02	-0.07	-0.10	0.46	0.42	-0.21	0.72
12	34	1.00	0.04	0.76	-0.34	-0.07	0.05	-0.19	-0.16	0.14	-0.10	0.38	0.48	-0.36	0.79
13	37	1.00	0.29	0.68	-0.34	0.06	0.14	-0.23	-0.27	0.20	0.12	0.23	0.46	-0.10	0.73
14	40	1.00	0.08	0.80	-0.56	-0.14	0.10	-0.10	-0.12	0.08	0.12	0.38	0.52	-0.29	0.82
15	43	1.00	0.26	0.79	-0.14	-0.24	0.18	-0.02	-0.01	-0.02	-0.13	0.28	0.47	-0.29	0.75
16	46	1.00	0.00	0.58	-0.51	-0.17	0.23	-0.05	-0.02	-0.18	-0.25	0.32	0.30	-0.35	0.67
17	49	1.00	0.14	0.54	-0.32	-0.09	0.04	-0.12	0.02	0.08	-0.04	0.39	0.39	-0.20	0.73
18	51	1.00	-0.17	0.59	-0.56	-0.20	-0.10	0.03	-0.08	0.24	-0.19	0.21	0.37	-0.25	0.71
19	54	1.00	0.48	0.64	-0.29	0.17	-0.04	-0.03	-0.16	0.32	0.01	0.35	0.39	0.27	0.74
20	57	1.00	0.27	0.73	-0.23	-0.02	-0.14	-0.07	-0.24	0.45	-0.02	0.28	0.47	0.01	0.72

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
21	60	1.00	-0.19	0.77	-0.58	-0.32	-0.14	0.12	-0.11	0.29	0.00	0.17	0.42	-0.24	0.79
22	63	1.00	0.30	0.52	-0.14	-0.04	-0.17	-0.11	-0.26	0.32	-0.24	0.08	0.42	0.03	0.47
23	66	1.00	0.25	0.48	-0.46	-0.38	-0.10	0.18	0.10	0.03	0.00	-0.04	0.21	-0.42	0.53
24	69	1.00	0.31	0.49	-0.40	0.06	0.12	0.01	-0.08	-0.06	-0.06	0.01	0.39	0.02	0.42
25	71	1.00	0.04	0.67	-0.56	-0.26	-0.09	0.08	-0.20	0.16	0.08	0.29	0.35	-0.32	0.69
26	74	1.00	0.30	0.67	-0.43	-0.11	0.07	0.10	0.05	-0.07	0.27	0.29	0.32	-0.13	0.70
27	77	1.00	0.16	0.80	-0.46	-0.23	0.17	-0.10	-0.20	-0.05	0.01	0.36	0.56	-0.29	0.89
28	80	1.00	0.09	0.68	-0.61	-0.30	0.17	-0.03	0.02	-0.04	0.15	0.26	0.31	-0.34	0.81
29	83	1.00	0.06	0.62	-0.66	-0.27	0.27	-0.09	0.10	-0.17	0.09	0.14	0.28	-0.32	0.65
30	86	1.00	0.22	0.68	-0.62	-0.16	0.17	0.05	-0.06	0.13	-0.16	0.32	0.32	-0.18	0.71
31	89	1.00	0.40	0.80	-0.19	-0.15	0.04	0.18	-0.07	0.10	0.07	0.30	0.54	-0.16	0.85
32	91	1.00	-0.09	0.33	-0.58	-0.16	0.30	-0.21	-0.22	-0.14	0.26	-0.07	0.12	-0.18	0.32
33	94	1.00	0.16	0.55	-0.24	-0.02	-0.09	-0.08	-0.34	0.37	0.11	0.33	0.37	-0.04	0.53
34	97	1.00	-0.10	0.53	-0.61	-0.30	-0.07	0.08	-0.02	0.03	0.27	0.21	0.40	-0.34	0.58

Supplementary table 4.13. Correlations between body weight and daily measure of weight gain (ADG), feed intake (ADFI), feed conversion ratio (DFCR), cumulative feed conversion ratio (DCFCR), carcass composition (thigh yield TY, breast yield BMY, abdominal fat yield AFY) and meat quality (breast luminance L, redness a*, yellowness b* and ultimate pH pHu), in standard chickens. CFRCrf stands for final cumulative feed conversion ratio.

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFRCrf	Slaughter weight
Alternative diet															
5	14	0.71	0.30	1.00	-0.17	-0.24	-0.08	0.22	-0.40	-0.40	0.28	0.21	0.35	-0.48	0.60
6	17	0.71	0.06	1.00	-0.18	-0.32	0.00	0.15	-0.09	-0.23	-0.07	0.12	0.13	-0.51	0.63
7	20	0.84	-0.13	1.00	-0.40	-0.37	0.22	0.04	0.09	-0.44	0.22	0.28	0.24	-0.55	0.62
8	23	0.55	0.14	1.00	-0.08	-0.08	0.30	-0.13	0.02	-0.46	0.22	0.21	0.35	-0.47	0.71
9	26	0.88	0.37	1.00	-0.32	-0.10	0.23	0.00	-0.02	-0.46	0.26	0.17	0.27	-0.33	0.62
10	29	0.91	0.38	1.00	-0.36	-0.10	0.25	-0.07	-0.10	-0.41	0.20	0.18	0.29	-0.35	0.61
11	31	0.78	0.38	1.00	-0.18	-0.14	0.26	-0.04	-0.06	-0.37	0.20	0.14	0.28	-0.37	0.64
12	34	0.85	0.32	1.00	-0.37	-0.16	0.21	-0.05	-0.13	-0.38	0.18	0.19	0.35	-0.34	0.63
13	37	0.79	0.25	1.00	-0.55	-0.26	0.28	0.01	-0.02	-0.32	0.27	0.03	0.25	-0.41	0.60
14	40	0.87	0.43	1.00	-0.63	-0.20	0.28	-0.12	-0.14	-0.38	0.18	0.20	0.43	-0.39	0.76
15	43	0.79	0.30	1.00	-0.40	-0.29	0.25	-0.11	-0.15	-0.39	0.17	0.20	0.40	-0.34	0.72
16	46	0.93	0.46	1.00	-0.42	-0.25	0.24	-0.13	-0.17	-0.37	0.13	0.25	0.46	-0.31	0.78
17	49	0.78	0.22	1.00	-0.25	-0.35	0.34	-0.12	-0.02	-0.48	0.20	-0.06	0.33	-0.47	0.74
18	51	0.80	0.24	1.00	-0.22	-0.32	0.33	-0.07	-0.06	-0.47	0.18	-0.08	0.36	-0.44	0.77
19	54	0.80	0.38	1.00	-0.13	-0.29	0.33	-0.09	-0.04	-0.52	0.21	-0.09	0.37	-0.45	0.77
20	57	0.74	-0.06	1.00	-0.49	-0.31	0.33	-0.12	-0.04	-0.49	0.23	-0.05	0.39	-0.45	0.77
21	60	0.68	-0.02	1.00	-0.47	-0.58	0.47	-0.21	0.25	-0.58	0.13	0.08	0.52	-0.57	0.85
22	63	0.78	0.21	1.00	-0.34	-0.32	0.39	-0.14	0.02	-0.53	0.11	-0.05	0.43	-0.39	0.82
23	66	0.74	0.35	1.00	-0.26	-0.52	0.24	-0.10	0.13	-0.36	0.00	0.19	0.61	-0.48	0.88
24	69	0.88	0.43	1.00	-0.21	-0.56	0.44	-0.13	0.19	-0.46	0.14	-0.08	0.58	-0.55	0.91
25	71	0.61	0.28	1.00	-0.29	-0.51	0.38	-0.05	-0.08	-0.45	0.38	-0.25	0.46	-0.54	0.88

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
26	74	0.33	0.10	1.00	-0.07	-0.35	0.26	-0.05	-0.13	-0.37	0.10	-0.19	0.54	-0.28	0.89
27	77	0.85	0.16	1.00	-0.26	-0.56	0.35	-0.04	0.17	-0.44	0.09	-0.06	0.61	-0.56	0.93
28	80	0.68	-0.04	1.00	-0.47	-0.40	0.19	0.03	-0.06	-0.30	0.14	-0.13	0.48	-0.48	0.90
29	83	0.16	0.04	1.00	-0.10	-0.43	0.30	0.02	0.01	-0.34	0.11	-0.18	0.52	-0.41	0.94
30	86	0.54	0.03	1.00	-0.46	-0.42	0.31	0.03	0.01	-0.34	0.10	-0.19	0.53	-0.42	0.95
31	89	0.51	0.27	1.00	0.06	-0.12	0.29	-0.09	-0.17	-0.16	-0.02	0.05	0.63	-0.25	0.97
32	91	0.60	-0.28	1.00	-0.47	-0.49	0.34	-0.08	0.08	-0.28	0.04	0.15	0.68	-0.48	0.96
33	94	0.61	0.06	1.00	-0.28	-0.44	0.32	-0.13	0.10	-0.28	-0.04	0.18	0.68	-0.44	0.96
34	97	0.57	-0.05	1.00	-0.49	-0.42	0.42	-0.12	0.14	-0.30	0.00	0.15	0.67	-0.42	0.97
Classical diet															
5	14	0.61	-0.14	1.00	-0.40	-0.31	-0.05	0.04	-0.12	0.14	-0.12	0.28	0.33	-0.29	0.68
6	17	0.66	0.04	1.00	-0.27	-0.28	0.04	-0.03	0.21	-0.02	-0.11	0.19	0.28	-0.24	0.52
7	20	0.72	-0.09	1.00	-0.31	-0.48	-0.29	0.20	-0.10	0.17	0.16	0.41	0.41	-0.35	0.62
8	23	0.55	-0.05	1.00	-0.27	-0.40	-0.18	0.17	0.02	0.04	0.02	0.20	0.33	-0.33	0.63
9	26	0.63	0.12	1.00	-0.19	-0.14	0.00	0.20	0.09	-0.02	0.00	0.22	0.33	-0.14	0.72
10	29	0.66	0.04	1.00	-0.23	-0.24	0.06	0.17	-0.03	-0.11	-0.08	0.28	0.43	-0.22	0.80
11	31	0.83	0.16	1.00	-0.32	-0.13	0.26	-0.01	0.18	-0.23	-0.01	0.33	0.31	-0.16	0.70
12	34	0.76	-0.04	1.00	-0.33	-0.19	0.30	-0.10	0.11	-0.26	0.07	0.27	0.32	-0.34	0.65
13	37	0.68	0.22	1.00	-0.23	-0.16	0.16	-0.09	-0.06	-0.03	-0.03	0.39	0.38	-0.04	0.81
14	40	0.80	0.14	1.00	-0.42	-0.13	0.17	-0.01	0.10	-0.06	-0.02	0.37	0.46	-0.23	0.83
15	43	0.79	0.28	1.00	-0.04	-0.26	0.24	-0.04	0.07	-0.10	0.01	0.28	0.47	-0.30	0.80
16	46	0.58	0.03	1.00	-0.33	-0.25	0.11	-0.05	0.08	-0.10	-0.07	0.29	0.52	-0.28	0.81
17	49	0.54	-0.03	1.00	-0.29	-0.35	0.25	-0.07	0.10	-0.16	-0.13	0.37	0.42	-0.39	0.81
18	51	0.59	-0.27	1.00	-0.48	-0.41	0.24	-0.06	0.06	-0.10	-0.09	0.38	0.39	-0.42	0.84
19	54	0.64	0.38	1.00	-0.13	0.03	0.38	-0.30	0.08	-0.11	-0.05	0.38	0.43	0.09	0.86
20	57	0.73	0.27	1.00	-0.11	-0.12	0.27	-0.19	-0.07	0.02	-0.02	0.30	0.51	-0.09	0.93

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
21	60	0.77	-0.15	1.00	-0.49	-0.31	0.16	0.02	0.01	0.08	-0.04	0.44	0.51	-0.22	0.91
22	63	0.52	0.23	1.00	-0.01	-0.29	0.08	0.01	0.07	0.05	-0.07	0.32	0.51	-0.24	0.93
23	66	0.48	0.19	1.00	-0.19	-0.49	0.01	-0.06	-0.10	0.07	-0.16	0.32	0.57	-0.41	0.93
24	69	0.49	0.38	1.00	0.01	-0.29	0.11	-0.25	-0.16	0.11	-0.12	0.21	0.52	-0.21	0.85
25	71	0.67	0.00	1.00	-0.40	-0.38	-0.01	-0.25	-0.33	0.22	-0.02	0.40	0.44	-0.34	0.91
26	74	0.67	0.06	1.00	-0.45	-0.28	0.05	-0.26	-0.39	0.24	-0.11	0.35	0.65	-0.27	0.90
27	77	0.80	0.14	1.00	-0.38	-0.43	-0.06	-0.05	-0.19	0.15	-0.11	0.41	0.54	-0.36	0.95
28	80	0.68	0.17	1.00	-0.35	-0.34	0.10	0.05	0.08	-0.07	0.02	0.30	0.51	-0.30	0.92
29	83	0.62	0.32	1.00	-0.20	-0.21	0.17	-0.18	-0.05	-0.05	-0.13	0.32	0.50	-0.18	0.98
30	86	0.68	0.11	1.00	-0.47	-0.46	0.05	0.01	-0.10	0.06	-0.09	0.39	0.57	-0.42	0.99
31	89	0.80	0.13	1.00	-0.34	-0.47	0.07	0.08	-0.03	0.07	-0.01	0.31	0.62	-0.45	0.97
32	91	0.33	-0.07	1.00	-0.24	-0.44	0.04	0.06	-0.12	0.11	-0.12	0.38	0.56	-0.39	0.98
33	94	0.55	0.09	1.00	-0.15	-0.34	0.03	0.08	-0.10	0.14	-0.04	0.38	0.64	-0.31	0.99
34	97	0.53	-0.05	1.00	-0.34	-0.40	0.18	-0.07	-0.15	0.02	0.01	0.28	0.64	-0.41	0.95

Supplementary table 4.14. Correlations between cumulative feed conversion ratio (DCFCR) and daily measure of weight gain (ADG), feed intake (ADFI), body weight (BW), feed conversion ratio (DFCR), carcass composition (thigh yield TY, breast yield BMY, abdominal fat yield AFY) and meat quality (breast luminance L, redness a*, yellowness b* and ultimate pH pHu), in standard chickens. CFCRf stands for final cumulative feed conversion ratio.

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
5	14	-0.42	0.53	-0.24	0.71	1.00	-0.28	-0.10	-0.17	-0.18	0.43	0.53	-0.20	0.18	-0.24
6	17	-0.17	0.79	-0.32	0.83	1.00	-0.29	-0.23	-0.33	-0.13	0.11	0.29	-0.13	0.20	-0.09
7	20	-0.30	0.84	-0.37	0.91	1.00	-0.26	-0.10	-0.51	0.04	0.22	-0.04	-0.12	0.50	-0.35
8	23	-0.06	0.67	-0.08	0.63	1.00	-0.11	-0.05	-0.26	-0.15	0.12	0.19	0.03	0.50	-0.08
9	26	0.12	0.68	-0.10	0.61	1.00	-0.08	-0.23	-0.36	-0.19	0.13	0.23	0.15	0.34	-0.02
10	29	-0.02	0.72	-0.10	0.69	1.00	-0.09	-0.20	-0.32	-0.20	0.10	0.24	0.17	0.40	0.00
11	31	-0.21	0.72	-0.14	0.76	1.00	-0.06	-0.22	-0.33	-0.21	0.05	0.27	0.19	0.45	0.00
12	34	0.01	0.61	-0.16	0.62	1.00	-0.08	-0.18	-0.29	-0.20	0.02	0.24	0.14	0.44	0.02
13	37	-0.02	0.75	-0.26	0.67	1.00	-0.09	-0.20	-0.33	-0.21	-0.06	0.32	0.20	0.47	0.06
14	40	0.01	0.67	-0.20	0.64	1.00	-0.10	-0.13	-0.24	-0.15	-0.06	0.22	0.08	0.54	-0.08
15	43	-0.06	0.45	-0.29	0.38	1.00	-0.07	-0.11	-0.22	-0.08	-0.10	0.21	0.08	0.51	-0.08
16	46	-0.17	0.62	-0.25	0.86	1.00	-0.06	-0.09	-0.20	-0.09	-0.11	0.17	0.04	0.55	-0.14
17	49	-0.03	0.48	-0.35	0.54	1.00	-0.05	-0.05	-0.13	-0.08	-0.14	0.23	0.03	0.59	-0.18
18	51	-0.24	0.38	-0.32	0.50	1.00	-0.03	-0.10	-0.07	-0.08	-0.19	0.22	0.00	0.61	-0.18
19	54	0.06	0.42	-0.29	0.52	1.00	0.03	-0.08	-0.05	-0.08	-0.24	0.19	0.03	0.64	-0.15
20	57	0.13	0.54	-0.31	0.51	1.00	0.04	-0.06	-0.01	-0.09	-0.28	0.13	0.03	0.63	-0.13
21	60	-0.39	0.28	-0.58	0.48	1.00	-0.26	0.14	-0.41	0.25	-0.14	-0.16	-0.36	0.78	-0.59
22	63	-0.26	0.42	-0.32	0.57	1.00	-0.06	-0.03	-0.02	0.01	-0.33	0.09	-0.05	0.68	-0.20
23	66	-0.46	0.23	-0.52	0.61	1.00	-0.18	0.13	-0.33	0.19	-0.18	-0.18	-0.35	0.79	-0.51
24	69	-0.58	0.15	-0.56	0.58	1.00	-0.30	0.14	-0.33	0.23	-0.23	-0.04	-0.37	0.82	-0.54
25	71	-0.22	0.44	-0.51	0.64	1.00	-0.24	0.04	-0.02	0.05	-0.36	0.22	-0.19	0.71	-0.34

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
26	74	-0.03	0.40	-0.35	0.37	1.00	0.05	-0.03	0.16	0.00	-0.42	0.15	-0.15	0.81	-0.15
27	77	-0.58	0.31	-0.56	0.59	1.00	-0.21	0.08	-0.24	0.22	-0.27	-0.06	-0.42	0.87	-0.53
28	80	-0.03	0.70	-0.40	0.72	1.00	0.08	-0.07	0.18	-0.06	-0.41	0.10	-0.14	0.87	-0.26
29	83	0.06	0.66	-0.43	0.58	1.00	-0.03	-0.05	0.15	-0.01	-0.40	0.16	-0.21	0.87	-0.36
30	86	-0.10	0.70	-0.42	0.74	1.00	-0.02	-0.05	0.17	-0.01	-0.40	0.17	-0.22	0.91	-0.37
31	89	0.06	0.59	-0.12	0.58	1.00	-0.01	-0.01	0.11	-0.09	-0.31	0.31	-0.08	0.94	-0.08
32	91	-0.26	0.68	-0.49	0.72	1.00	-0.17	0.07	-0.20	0.16	-0.27	0.04	-0.35	0.95	-0.48
33	94	-0.01	0.46	-0.44	0.50	1.00	-0.16	0.11	-0.23	0.15	-0.21	0.06	-0.33	0.98	-0.44
34	97	-0.18	0.67	-0.42	0.69	1.00	-0.22	0.12	-0.24	0.15	-0.24	0.09	-0.31	0.99	-0.44
Classical diet															
5	14	-0.11	0.75	-0.31	0.68	1.00	0.15	-0.05	0.01	-0.02	-0.15	0.15	-0.07	0.31	-0.05
6	17	-0.27	0.41	-0.28	0.46	1.00	0.13	-0.01	-0.18	0.02	0.10	0.10	-0.03	0.31	0.07
7	20	-0.16	0.76	-0.48	0.80	1.00	0.14	-0.16	-0.15	0.20	-0.12	-0.21	0.04	0.21	0.04
8	23	-0.03	0.61	-0.40	0.63	1.00	0.15	-0.18	-0.21	0.15	-0.03	0.07	0.01	0.43	0.08
9	26	-0.03	0.84	-0.14	0.80	1.00	0.19	-0.24	-0.24	0.12	-0.02	0.08	0.08	0.46	0.13
10	29	0.08	0.88	-0.24	0.83	1.00	0.09	-0.21	-0.20	0.20	0.05	0.14	-0.04	0.59	0.00
11	31	-0.05	0.87	-0.13	0.83	1.00	0.17	-0.22	-0.19	0.14	0.03	0.02	0.06	0.53	0.06
12	34	-0.07	0.80	-0.19	0.78	1.00	0.08	-0.19	-0.15	0.15	0.02	0.12	-0.11	0.61	-0.05
13	37	0.06	0.88	-0.16	0.81	1.00	0.15	-0.15	-0.14	0.11	0.05	0.02	0.04	0.65	0.03
14	40	-0.14	0.89	-0.13	0.81	1.00	0.21	-0.21	-0.13	0.07	0.04	0.03	0.00	0.65	-0.03
15	43	-0.24	0.45	-0.26	0.56	1.00	0.05	-0.15	-0.14	0.16	0.09	0.14	-0.14	0.76	-0.15
16	46	-0.17	0.88	-0.25	0.84	1.00	0.17	-0.16	-0.12	0.09	0.06	0.00	-0.09	0.72	-0.12
17	49	-0.09	0.69	-0.35	0.69	1.00	0.20	-0.22	-0.09	-0.03	0.08	-0.06	-0.14	0.68	-0.20
18	51	-0.20	0.80	-0.41	0.75	1.00	0.19	-0.11	0.03	-0.19	0.13	-0.12	-0.21	0.81	-0.21
19	54	0.17	0.69	0.03	0.64	1.00	-0.01	0.03	-0.13	0.16	0.19	0.15	0.08	0.68	0.20
20	57	-0.02	0.58	-0.12	0.62	1.00	-0.04	-0.01	0.00	0.12	0.14	0.24	-0.09	0.81	-0.06

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
21	60	-0.32	0.80	-0.31	0.81	1.00	0.28	-0.20	-0.02	-0.13	0.06	-0.04	-0.21	0.82	-0.28
22	63	-0.04	0.54	-0.29	0.62	1.00	0.07	-0.19	-0.17	0.15	0.12	0.21	-0.09	0.86	-0.20
23	66	-0.38	0.44	-0.49	0.69	1.00	0.13	-0.16	0.01	-0.04	0.10	0.07	-0.38	0.88	-0.44
24	69	0.06	0.54	-0.29	0.49	1.00	0.09	-0.02	0.05	-0.05	0.05	0.21	-0.30	0.86	-0.30
25	71	-0.26	0.57	-0.38	0.62	1.00	0.20	-0.05	0.09	-0.18	0.00	0.02	-0.21	0.85	-0.32
26	74	-0.11	0.55	-0.28	0.62	1.00	0.01	0.15	0.27	-0.14	0.20	0.05	-0.30	0.97	-0.27
27	77	-0.23	0.47	-0.43	0.59	1.00	0.23	-0.21	-0.11	-0.10	0.19	-0.03	-0.34	0.88	-0.37
28	80	-0.30	0.68	-0.34	0.75	1.00	0.07	-0.16	-0.14	0.06	0.12	0.13	-0.37	0.91	-0.32
29	83	-0.27	0.64	-0.21	0.65	1.00	0.09	0.11	-0.04	-0.06	0.14	0.07	-0.26	0.90	-0.22
30	86	-0.16	0.68	-0.46	0.69	1.00	0.19	-0.12	0.05	-0.18	0.08	-0.13	-0.40	0.95	-0.47
31	89	-0.15	0.56	-0.47	0.70	1.00	0.11	-0.10	0.01	0.00	0.19	0.01	-0.32	0.96	-0.38
32	91	-0.16	0.63	-0.44	0.60	1.00	0.19	-0.07	0.08	-0.23	0.15	-0.10	-0.44	0.98	-0.47
33	94	-0.02	0.49	-0.34	0.52	1.00	0.12	-0.04	0.03	-0.10	0.13	-0.04	-0.30	0.99	-0.38
34	97	-0.30	0.63	-0.40	0.68	1.00	0.05	0.01	0.05	0.01	0.09	0.06	-0.34	0.99	-0.35

Supplementary table 4.15. Correlations between feed conversion ratio (DFCR) and daily measure of weight gain (ADG), feed intake (ADFI), body weight (BW), cumulative feed conversion ratio (DCFCR), carcass composition (thigh yield TY, breast yield BMY, abdominal fat yield AFY) and meat quality (breast luminance L, redness a*, yellowness b* and ultimate pH pHu), in standard chickens.

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
5	14	-0.56	0.81	-0.17	1.00	0.71	-0.44	0.09	-0.48	0.02	0.27	0.26	-0.18	-0.09	-0.22
6	17	-0.26	0.94	-0.18	1.00	0.83	-0.07	-0.39	-0.26	-0.21	-0.16	0.39	-0.19	0.27	-0.07
7	20	-0.40	0.91	-0.40	1.00	0.91	-0.31	-0.04	-0.54	0.25	0.10	-0.12	-0.02	0.49	-0.31
8	23	-0.32	0.94	-0.08	1.00	0.63	-0.12	-0.12	-0.18	-0.03	-0.04	0.36	0.18	0.45	-0.03
9	26	-0.32	0.67	-0.32	1.00	0.61	-0.06	-0.08	-0.25	-0.06	-0.16	0.30	0.16	0.51	0.04
10	29	-0.43	0.68	-0.36	1.00	0.69	0.07	-0.21	-0.09	-0.02	-0.23	0.21	0.16	0.42	0.13
11	31	-0.50	0.77	-0.18	1.00	0.76	0.00	-0.19	-0.20	-0.16	-0.24	0.36	0.24	0.50	0.16
12	34	-0.37	0.67	-0.37	1.00	0.62	-0.37	0.24	-0.13	-0.21	-0.17	0.01	-0.16	0.48	-0.27
13	37	-0.58	0.48	-0.55	1.00	0.67	-0.02	0.00	0.03	0.15	-0.33	0.02	-0.10	0.46	-0.16
14	40	-0.61	0.24	-0.63	1.00	0.64	-0.06	0.09	0.08	0.07	-0.25	-0.09	-0.20	0.53	-0.43
15	43	-0.59	0.46	-0.40	1.00	0.38	0.11	0.19	0.22	0.02	-0.12	-0.24	-0.27	0.31	-0.50
16	46	-0.39	0.54	-0.42	1.00	0.86	0.02	-0.07	0.17	-0.04	-0.37	0.11	-0.06	0.68	-0.22
17	49	-0.27	0.82	-0.25	1.00	0.54	0.11	0.09	0.25	0.21	-0.18	0.27	-0.14	0.38	-0.15
18	51	-0.37	0.84	-0.22	1.00	0.50	0.09	-0.11	0.19	0.05	-0.53	-0.10	-0.03	0.47	0.10
19	54	0.07	0.80	-0.13	1.00	0.52	0.30	0.04	0.12	-0.29	-0.26	-0.10	0.11	0.39	0.06
20	57	-0.24	0.84	-0.49	1.00	0.51	-0.07	0.02	0.24	0.16	-0.20	-0.16	-0.08	0.34	-0.24
21	60	-0.62	0.77	-0.47	1.00	0.48	-0.31	-0.11	0.01	0.16	-0.54	0.00	-0.25	0.46	-0.30
22	63	-0.44	0.76	-0.34	1.00	0.57	-0.24	0.14	-0.03	0.09	-0.24	0.10	-0.36	0.62	-0.25
23	66	-0.42	0.66	-0.26	1.00	0.61	-0.05	0.18	0.13	-0.04	-0.34	0.04	-0.26	0.51	-0.10
24	69	-0.40	0.73	-0.21	1.00	0.58	-0.16	-0.11	0.01	-0.18	-0.31	0.02	-0.26	0.54	-0.16
25	71	-0.49	0.61	-0.29	1.00	0.64	0.09	0.03	0.18	0.09	-0.19	0.07	-0.24	0.66	-0.25
26	74	-0.39	0.85	-0.07	1.00	0.37	0.48	-0.09	0.07	-0.17	-0.34	-0.23	-0.31	0.50	0.01

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Alternative diet															
27	77	-0.34	0.88	-0.26	1.00	0.59	-0.12	-0.04	0.15	0.06	-0.12	0.04	-0.26	0.60	-0.25
28	80	-0.28	0.83	-0.47	1.00	0.72	0.12	-0.02	0.25	-0.11	-0.25	0.13	-0.19	0.93	-0.47
29	83	-0.46	0.81	-0.10	1.00	0.58	0.15	0.12	0.31	-0.28	-0.13	0.20	-0.04	0.82	-0.21
30	86	-0.53	0.56	-0.46	1.00	0.74	-0.16	-0.08	0.18	0.02	-0.25	0.35	-0.37	0.73	-0.50
31	89	-0.10	0.92	0.06	1.00	0.58	0.29	0.08	0.11	-0.28	0.05	0.19	0.03	0.67	0.03
32	91	-0.42	0.95	-0.47	1.00	0.72	-0.09	0.01	0.11	0.12	-0.38	0.01	-0.24	0.79	-0.53
33	94	-0.14	0.86	-0.28	1.00	0.50	-0.03	0.06	-0.13	0.04	-0.02	0.26	-0.14	0.55	-0.31
34	97	-0.63	0.67	-0.49	1.00	0.69	-0.23	0.31	-0.18	0.00	-0.03	-0.05	-0.35	0.75	-0.59
Classical diet															
5	14	-0.50	0.87	-0.40	1.00	0.68	0.17	-0.12	0.15	-0.20	-0.02	-0.14	-0.28	0.60	-0.37
6	17	-0.51	0.88	-0.27	1.00	0.46	-0.08	0.18	-0.17	0.08	0.38	0.06	-0.24	0.51	-0.04
7	20	-0.18	0.95	-0.31	1.00	0.80	0.26	-0.14	0.10	0.03	0.04	-0.16	0.10	0.23	-0.01
8	23	-0.15	0.93	-0.27	1.00	0.63	0.11	0.04	0.00	-0.01	0.22	0.09	-0.16	0.62	-0.07
9	26	-0.34	0.87	-0.19	1.00	0.80	0.14	-0.16	-0.12	0.12	0.12	0.03	0.06	0.64	-0.03
10	29	-0.19	0.91	-0.23	1.00	0.83	-0.01	-0.15	-0.16	0.22	0.17	0.17	-0.12	0.76	-0.12
11	31	-0.38	0.82	-0.32	1.00	0.83	0.09	-0.09	-0.10	0.08	0.14	-0.07	-0.11	0.74	-0.16
12	34	-0.34	0.92	-0.33	1.00	0.78	0.06	-0.06	0.12	0.04	0.04	0.01	-0.17	0.51	-0.27
13	37	-0.34	0.79	-0.23	1.00	0.81	0.19	0.02	0.13	-0.13	-0.06	0.10	-0.10	0.80	-0.22
14	40	-0.56	0.75	-0.42	1.00	0.81	0.14	-0.11	0.02	-0.04	-0.01	-0.09	-0.26	0.82	-0.37
15	43	-0.14	0.91	-0.04	1.00	0.56	-0.10	0.05	-0.15	0.07	0.25	0.02	-0.15	0.47	-0.13
16	46	-0.51	0.84	-0.33	1.00	0.84	0.12	-0.16	-0.02	0.03	0.10	-0.03	-0.15	0.87	-0.30
17	49	-0.32	0.88	-0.29	1.00	0.69	0.37	-0.18	0.15	-0.30	0.05	-0.04	-0.03	0.39	-0.21
18	51	-0.56	0.91	-0.48	1.00	0.75	0.15	-0.10	0.04	-0.23	0.14	0.00	-0.43	0.73	-0.39
19	54	-0.29	0.69	-0.13	1.00	0.64	0.13	0.26	0.24	-0.25	0.08	0.17	-0.13	0.47	-0.08
20	57	-0.23	0.87	-0.11	1.00	0.62	0.07	0.04	0.13	-0.22	-0.07	0.19	-0.05	0.71	-0.14
21	60	-0.58	0.89	-0.49	1.00	0.81	0.23	-0.16	0.11	-0.24	0.11	-0.09	-0.41	0.80	-0.53

Age	% of slaughter age	ADG	ADFI	BW	DFCR	DCFCR	L	a*	b*	pHu	TY	AFP	BMY	CFCRf	Slaughter weight
Classical diet															
22	63	-0.14	0.90	-0.01	1.00	0.62	0.15	-0.06	-0.03	0.01	-0.03	0.36	-0.02	0.62	-0.04
23	66	-0.46	0.74	-0.19	1.00	0.69	-0.04	-0.25	-0.11	0.17	0.11	0.13	-0.28	0.69	-0.21
24	69	-0.40	0.75	0.01	1.00	0.49	-0.05	0.06	0.12	0.05	0.04	0.38	-0.14	0.51	0.02
25	71	-0.56	0.79	-0.40	1.00	0.62	0.02	0.05	0.10	-0.13	0.04	-0.20	-0.21	0.58	-0.33
26	74	-0.43	0.73	-0.45	1.00	0.62	-0.04	0.27	0.09	-0.06	0.22	-0.03	-0.36	0.66	-0.41
27	77	-0.46	0.79	-0.38	1.00	0.59	0.11	0.08	0.08	-0.17	0.15	-0.17	-0.49	0.64	-0.42
28	80	-0.61	0.73	-0.35	1.00	0.75	-0.16	0.10	-0.14	0.04	0.07	-0.06	-0.39	0.89	-0.42
29	83	-0.66	0.69	-0.20	1.00	0.65	-0.18	0.26	-0.13	0.07	0.07	-0.01	-0.31	0.82	-0.23
30	86	-0.62	0.61	-0.47	1.00	0.69	-0.07	0.03	0.01	-0.19	0.23	-0.26	-0.41	0.79	-0.50
31	89	-0.19	0.82	-0.34	1.00	0.70	0.01	-0.06	-0.14	0.07	0.22	-0.19	-0.37	0.71	-0.28
32	91	-0.58	0.85	-0.24	1.00	0.60	0.06	0.06	0.16	-0.22	-0.03	-0.09	-0.15	0.66	-0.27
33	94	-0.24	0.92	-0.15	1.00	0.52	-0.07	0.10	-0.03	-0.06	0.02	0.08	-0.33	0.61	-0.20
34	97	-0.61	0.82	-0.34	1.00	0.68	0.00	0.07	-0.03	-0.03	-0.07	-0.09	-0.36	0.72	-0.33

Annexe 5 : Tables supplémentaires de l'article "Profiles of genetic parameters of body weight and feed efficiency in two divergent broiler lines for meat ultimate pH"

Supplementary table 5.1. Least square means of daily cumulative feed conversion ratio (DCFCR) and average daily gain (ADG) for the two lines of pHu animals, and significance of the line effect.

Age	DCFCR			ADG		
	pHu-	pHu+	<i>P-value</i>	pHu-	pHu+	<i>P-value</i>
5	1.52	1.64	6.14E-02	12.4	11.2	7.47E-07
6	1.36	1.43	2.28E-02	14.4	12.7	9.31E-12
7	1.33	1.39	2.04E-02	15.8	14.1	8.60E-12
8	1.29	1.35	4.03E-04	18.1	16.3	7.64E-14
9	1.34	1.39	3.47E-03	20.8	19.3	1.60E-08
10	1.35	1.40	1.51E-04	23.8	22.3	4.05E-07
11	1.36	1.41	2.23E-04	27.7	25.9	2.05E-07
12	1.36	1.41	9.62E-05	31.7	29.7	6.84E-07
13	1.36	1.41	3.18E-05	34.7	32.2	6.31E-09
14	1.35	1.41	1.12E-06	37.6	35.0	1.52E-09
15	1.36	1.42	1.88E-08	40.2	37.8	8.86E-07
16	1.35	1.42	6.55E-12	41.9	39.7	1.08E-05
17	1.36	1.43	1.97E-12	44.9	43.2	1.02E-03
18	1.38	1.45	9.27E-12	47.6	45.9	1.47E-03
19	1.40	1.46	2.43E-14	51.4	49.5	2.01E-03
20	1.41	1.48	7.38E-18	55.0	53.5	1.57E-02
21	1.42	1.48	4.71E-17	57.8	56.6	7.52E-02
22	1.43	1.49	8.39E-16	60.2	59.9	5.83E-01
23	1.44	1.50	3.61E-16	61.4	61.0	5.30E-01
24	1.45	1.51	4.98E-15	63.6	62.7	1.53E-01
25	1.47	1.52	6.71E-16	65.6	64.8	2.31E-01
26	1.48	1.54	3.03E-16	67.0	65.8	7.41E-02
27	1.49	1.55	3.05E-17	69.3	68.4	1.84E-01
28	1.50	1.57	7.75E-18	70.7	70.7	9.54E-01
29	1.51	1.58	8.93E-19	70.3	71.1	2.87E-01
30	1.53	1.59	8.04E-18	71.7	72.2	5.42E-01
31	1.54	1.61	9.97E-17	72.0	73.2	1.24E-01
32	1.56	1.63	2.03E-17	71.9	72.7	3.14E-01
33	1.57	1.64	4.04E-16	73.8	74.7	2.48E-01
34	1.59	1.65	1.19E-15	74.2	75.9	4.27E-02
35	1.60	1.67	4.50E-15	74.4	75.4	2.32E-01
36	1.62	1.68	1.01E-14	74.7	75.3	5.06E-01
37	1.63	1.70	5.51E-15	73.9	73.5	6.86E-01
38	1.65	1.71	4.61E-16	73.9	73.2	4.25E-01
39	1.66	1.73	4.15E-17	75.2	75.7	6.28E-01
40	1.68	1.75	1.13E-16	74.9	76.3	1.87E-01
41	1.69	1.76	1.31E-15			
42	1.71	1.78	2.98E-15			

Supplementary table 5.2. Least square means of daily feed intake (DFI) and body weight (BW) for the two lines of pHu animals, and significance of the line effect.

Age	DFI			BW		
	pHu-	pHu+	<i>P</i> -value	pHu-	pHu+	<i>P</i> -value
3	4.7	4.6	6.99E-01	54.0	55.7	5.18E-02
4	9.0	9.6	2.92E-01	64.7	67.7	4.06E-03
5	13.7	12.4	3.57E-03	81.6	81.8	8.46E-01
6	21.1	18.5	1.20E-08	97.5	95.6	7.93E-02
7	23.9	21.8	6.06E-05	116.5	111.6	2.47E-04
8	28.4	26.4	1.26E-02	138.1	131.6	2.97E-05
9	34.6	34.1	5.54E-01	159.7	151.6	3.44E-06
10	41.0	39.6	3.63E-02	187.6	177.3	5.04E-07
11	46.4	45.5	2.31E-01	220.0	208.2	7.56E-07
12	50.4	50.5	9.15E-01	257.2	243.1	4.53E-07
13	56.2	56.0	7.43E-01	298.2	281.2	8.74E-08
14	61.4	61.7	6.60E-01	346.0	325.8	3.50E-08
15	68.3	68.8	5.58E-01	393.6	369.2	4.83E-09
16	67.1	68.6	8.71E-02	445.4	417.9	1.77E-09
17	75.6	76.3	4.97E-01	499.3	470.4	1.62E-08
18	88.0	88.5	6.10E-01	555.3	524.3	3.88E-08
19	94.1	94.4	8.48E-01	617.9	585.1	1.19E-07
20	100.3	101.0	5.12E-01	683.1	646.4	4.85E-08
21	105.8	108.3	8.36E-02	756.2	718.2	3.22E-07
22	113.4	114.5	4.65E-01	829.5	791.0	2.88E-06
23	120.2	123.9	1.35E-02	906.9	867.3	9.58E-06
24	122.7	125.5	6.47E-02	983.8	944.9	4.32E-05
25	129.1	132.4	4.03E-02	1063.4	1022.3	6.24E-05
26	136.0	141.0	5.64E-03	1147.3	1103.7	6.31E-05
27	141.1	147.1	1.43E-03	1235.0	1191.2	1.48E-04
28	144.3	153.6	6.77E-07	1318.8	1273.1	1.91E-04
29	150.3	157.8	8.96E-05	1409.7	1363.4	3.17E-04
30	153.9	163.6	2.94E-07	1500.8	1457.3	1.37E-03
31	157.6	166.9	8.49E-06	1586.6	1544.8	3.21E-03
32	161.9	169.4	7.09E-04	1677.5	1634.1	3.52E-03
33	170.5	177.0	7.74E-03	1769.9	1729.5	9.48E-03
34	172.9	180.6	4.36E-04	1860.4	1821.0	1.55E-02
35	176.0	181.6	1.31E-02	1955.5	1918.4	2.83E-02
36	178.9	188.9	4.69E-06	2048.4	2013.5	4.72E-02
37	182.4	190.8	6.67E-04	2141.7	2106.6	5.23E-02
38	182.3	191.3	2.30E-04	2233.9	2197.2	4.96E-02
39	187.9	195.9	2.74E-03	2325.0	2286.1	4.53E-02
40	193.1	199.3	2.22E-02	2418.0	2379.3	5.27E-02
41	193.1	200.9	7.86E-03	2518.5	2483.1	8.63E-02
42	200.4	210.2	2.37E-03	2606.7	2576.6	1.64E-01

Supplementary table 5.3. Heritability estimates (\pm standard errors) of the average daily gain (ADG), body weight (BW), daily cumulative feed conversion ratio (DCFCR), and daily feed intake (DFI) for the pHu+ and pHu- lines.

Age (d)	pHu+				pHu-			
	ADG	BW	DCFCR	DFI	ADG	BW	DCFCR	DFI
3								
4		0.32 \pm 0.04		0.19 \pm 0.05		0.54 \pm 0.07		0.31 \pm 0.06
5	0.15 \pm 0.03	0.47 \pm 0.04	0.19 \pm 0.04	0.14 \pm 0.03	0.30 \pm 0.06	0.38 \pm 0.07	0.08 \pm 0.03	0.21 \pm 0.05
6	0.09 \pm 0.02	0.24 \pm 0.04	0.12 \pm 0.03	0.26 \pm 0.04	0.28 \pm 0.04	0.59 \pm 0.05	0.10 \pm 0.02	0.16 \pm 0.04
7	0.15 \pm 0.02	0.44 \pm 0.04	0.09 \pm 0.02	0.12 \pm 0.03	0.37 \pm 0.06	0.50 \pm 0.06	0.08 \pm 0.02	0.18 \pm 0.04
8	0.30 \pm 0.05	0.39 \pm 0.05	0.10 \pm 0.03	0.15 \pm 0.05	0.32 \pm 0.05	0.46 \pm 0.05	0.20 \pm 0.03	0.23 \pm 0.03
9	0.36 \pm 0.05	0.49 \pm 0.04	0.10 \pm 0.03	0.22 \pm 0.04	0.53 \pm 0.05	0.62 \pm 0.04	0.22 \pm 0.03	0.28 \pm 0.04
10	0.26 \pm 0.04	0.39 \pm 0.06	0.08 \pm 0.02	0.18 \pm 0.03	0.45 \pm 0.06	0.62 \pm 0.05	0.14 \pm 0.02	0.33 \pm 0.04
11	0.29 \pm 0.03	0.32 \pm 0.05	0.13 \pm 0.03	0.22 \pm 0.03	0.43 \pm 0.05	0.78 \pm 0.04	0.25 \pm 0.03	0.31 \pm 0.03
12	0.19 \pm 0.03	0.43 \pm 0.05	0.12 \pm 0.03	0.24 \pm 0.04	0.57 \pm 0.06	0.74 \pm 0.06	0.31 \pm 0.03	0.33 \pm 0.05
13	0.24 \pm 0.04	0.54 \pm 0.04	0.28 \pm 0.04	0.35 \pm 0.04	0.24 \pm 0.04	0.76 \pm 0.04	0.31 \pm 0.04	0.29 \pm 0.04
14	0.51 \pm 0.05	0.35 \pm 0.05	0.24 \pm 0.03	0.19 \pm 0.04	0.46 \pm 0.05	0.83 \pm 0.02	0.33 \pm 0.04	0.14 \pm 0.04
15	0.36 \pm 0.06	0.41 \pm 0.04	0.23 \pm 0.03	0.25 \pm 0.04	0.43 \pm 0.05	0.68 \pm 0.04	0.40 \pm 0.05	0.07 \pm 0.01
16	0.61 \pm 0.04	0.46 \pm 0.05	0.28 \pm 0.03	0.19 \pm 0.03	0.35 \pm 0.04	0.74 \pm 0.03	0.53 \pm 0.05	0.14 \pm 0.03
17	0.44 \pm 0.05	0.47 \pm 0.04	0.29 \pm 0.04	0.34 \pm 0.03	0.41 \pm 0.03	0.67 \pm 0.03	0.45 \pm 0.05	0.29 \pm 0.03
18	0.49 \pm 0.05	0.52 \pm 0.05	0.32 \pm 0.04	0.38 \pm 0.04	0.44 \pm 0.03	0.71 \pm 0.03	0.41 \pm 0.04	0.22 \pm 0.03
19	0.46 \pm 0.05	0.62 \pm 0.05	0.37 \pm 0.05	0.38 \pm 0.04	0.39 \pm 0.03	0.65 \pm 0.05	0.37 \pm 0.05	0.34 \pm 0.05
20	0.53 \pm 0.05	0.67 \pm 0.05	0.47 \pm 0.04	0.45 \pm 0.04	0.50 \pm 0.03	0.71 \pm 0.03	0.34 \pm 0.04	0.30 \pm 0.03
21	0.56 \pm 0.05	0.61 \pm 0.04	0.34 \pm 0.04	0.42 \pm 0.05	0.53 \pm 0.03	0.61 \pm 0.05	0.38 \pm 0.06	0.32 \pm 0.03
22	0.48 \pm 0.04	0.56 \pm 0.04	0.41 \pm 0.04	0.44 \pm 0.04	0.43 \pm 0.04	0.59 \pm 0.03	0.39 \pm 0.05	0.15 \pm 0.03
23	0.57 \pm 0.04	0.56 \pm 0.04	0.44 \pm 0.04	0.44 \pm 0.04	0.46 \pm 0.04	0.62 \pm 0.03	0.42 \pm 0.05	0.30 \pm 0.03
24	0.53 \pm 0.04	0.57 \pm 0.05	0.47 \pm 0.04	0.41 \pm 0.04	0.40 \pm 0.04	0.60 \pm 0.03	0.43 \pm 0.04	0.33 \pm 0.04
25	0.57 \pm 0.04	0.55 \pm 0.04	0.40 \pm 0.03	0.47 \pm 0.04	0.36 \pm 0.04	0.52 \pm 0.03	0.47 \pm 0.03	0.35 \pm 0.05

Supplementary table 5.3. Heritability estimates (+ standard errors) of the average daily gain (ADG), body weight (BW), daily cumulative feed conversion ratio (DCFCR), and daily feed intake (DFI) for the pHu+ and pHu- lines.

	ADG	pHu+ BW	DCFCR	DFI	ADG	pHu- BW	DCFCR	DFI
26	0.53 ± 0.04	0.55 ± 0.05	0.49 ± 0.03	0.51 ± 0.04	0.53 ± 0.04	0.55 ± 0.03	0.51 ± 0.04	0.37 ± 0.06
27	0.45 ± 0.04	0.55 ± 0.04	0.36 ± 0.04	0.34 ± 0.03	0.42 ± 0.04	0.49 ± 0.03	0.53 ± 0.04	0.32 ± 0.05
28	0.39 ± 0.04	0.56 ± 0.04	0.34 ± 0.03	0.41 ± 0.04	0.35 ± 0.04	0.56 ± 0.03	0.53 ± 0.04	0.26 ± 0.04
29	0.36 ± 0.05	0.54 ± 0.04	0.33 ± 0.04	0.30 ± 0.05	0.34 ± 0.04	0.50 ± 0.03	0.59 ± 0.05	0.25 ± 0.04
30	0.29 ± 0.03	0.54 ± 0.04	0.34 ± 0.04	0.24 ± 0.03	0.26 ± 0.03	0.54 ± 0.04	0.60 ± 0.04	0.27 ± 0.05
31	0.28 ± 0.03	0.53 ± 0.04	0.32 ± 0.04	0.17 ± 0.03	0.25 ± 0.03	0.49 ± 0.04	0.57 ± 0.04	0.16 ± 0.04
32	0.31 ± 0.04	0.53 ± 0.04	0.28 ± 0.04	0.23 ± 0.03	0.25 ± 0.04	0.51 ± 0.04	0.51 ± 0.04	0.28 ± 0.04
33	0.35 ± 0.04	0.51 ± 0.04	0.31 ± 0.03	0.21 ± 0.02	0.37 ± 0.04	0.50 ± 0.03	0.54 ± 0.04	0.20 ± 0.04
34	0.36 ± 0.04	0.51 ± 0.04	0.30 ± 0.04	0.26 ± 0.03	0.31 ± 0.04	0.47 ± 0.04	0.58 ± 0.04	0.32 ± 0.03
35	0.36 ± 0.04	0.52 ± 0.04	0.30 ± 0.03	0.33 ± 0.04	0.30 ± 0.04	0.49 ± 0.04	0.61 ± 0.04	0.22 ± 0.03
36	0.35 ± 0.04	0.51 ± 0.04	0.30 ± 0.03	0.17 ± 0.03	0.25 ± 0.03	0.43 ± 0.03	0.57 ± 0.04	0.20 ± 0.04
37	0.29 ± 0.04	0.49 ± 0.04	0.28 ± 0.04	0.13 ± 0.02	0.12 ± 0.03	0.42 ± 0.04	0.56 ± 0.05	0.16 ± 0.04
38	0.26 ± 0.04	0.47 ± 0.03	0.27 ± 0.04	0.22 ± 0.03	0.14 ± 0.02	0.41 ± 0.04	0.57 ± 0.04	0.16 ± 0.03
39	0.29 ± 0.03	0.45 ± 0.03	0.33 ± 0.05	0.25 ± 0.03	0.23 ± 0.04	0.38 ± 0.04	0.59 ± 0.04	0.30 ± 0.04
40	0.23 ± 0.03	0.43 ± 0.04	0.34 ± 0.05	0.16 ± 0.03	0.21 ± 0.05	0.38 ± 0.04	0.54 ± 0.03	0.24 ± 0.03
41		0.42 ± 0.03	0.36 ± 0.06	0.18 ± 0.02		0.37 ± 0.03	0.52 ± 0.04	0.24 ± 0.04
42		0.39 ± 0.03	0.36 ± 0.08	0.11 ± 0.03		0.35 ± 0.03	0.63 ± 0.07	0.24 ± 0.03

Supplementary table 5.4. Genetic correlations (\pm standard errors) between final cumulative feed conversion ratio (DCFCR42) and average daily gain (ADG), body weight (BW), daily cumulative feed conversion ratio (DCFCR), and daily feed intake (DFI).

	pHu+				pHu-			
	ADG	BW	DCFCR	DFI	ADG	BW	DCFCR	DFI
3								
4		0.40 \pm 0.07		-0.03 \pm 0.07		-0.21 \pm 0.11		0.07 \pm 0.13
5	-0.25 \pm 0.07	0.04 \pm 0.06	0.53 \pm 0.14	0.71 \pm 0.09	0.14 \pm 0.10	0.10 \pm 0.06	0.24 \pm 0.09	0.28 \pm 0.08
6	0.05 \pm 0.07	0.06 \pm 0.06	0.17 \pm 0.10	0.66 \pm 0.12	0.05 \pm 0.14	0.00 \pm 0.11	0.46 \pm 0.11	0.21 \pm 0.08
7	0.40 \pm 0.05	0.21 \pm 0.05	0.10 \pm 0.07	0.61 \pm 0.07	-0.12 \pm 0.11	-0.01 \pm 0.05	0.88 \pm 0.10	0.72 \pm 0.09
8	0.22 \pm 0.07	0.06 \pm 0.05	0.08 \pm 0.04	0.76 \pm 0.06	0.08 \pm 0.08	0.03 \pm 0.07	0.86 \pm 0.11	0.70 \pm 0.07
9	0.12 \pm 0.06	0.30 \pm 0.05	-0.16 \pm 0.04	0.69 \pm 0.08	-0.04 \pm 0.10	-0.12 \pm 0.07	0.84 \pm 0.11	0.51 \pm 0.09
10	0.27 \pm 0.06	0.39 \pm 0.05	0.34 \pm 0.06	0.52 \pm 0.07	0.02 \pm 0.09	0.07 \pm 0.10	0.75 \pm 0.11	0.24 \pm 0.10
11	-0.05 \pm 0.06	0.13 \pm 0.06	0.71 \pm 0.05	0.57 \pm 0.05	0.13 \pm 0.11	0.03 \pm 0.09	0.80 \pm 0.12	0.23 \pm 0.06
12	0.14 \pm 0.05	0.26 \pm 0.06	0.53 \pm 0.06	0.70 \pm 0.07	-0.02 \pm 0.10	-0.06 \pm 0.09	0.74 \pm 0.09	0.39 \pm 0.06
13	0.16 \pm 0.06	0.01 \pm 0.06	0.65 \pm 0.07	0.71 \pm 0.05	0.04 \pm 0.07	-0.05 \pm 0.08	0.69 \pm 0.09	0.46 \pm 0.05
14	0.06 \pm 0.06	0.03 \pm 0.05	0.65 \pm 0.06	0.59 \pm 0.10	-0.20 \pm 0.06	0.01 \pm 0.09	0.66 \pm 0.07	0.29 \pm 0.10
15	0.25 \pm 0.06	0.10 \pm 0.07	0.71 \pm 0.05	0.45 \pm 0.15	-0.32 \pm 0.06	-0.08 \pm 0.08	0.55 \pm 0.06	0.21 \pm 0.09
16	0.32 \pm 0.08	0.14 \pm 0.05	0.64 \pm 0.05	0.25 \pm 0.12	-0.03 \pm 0.06	-0.09 \pm 0.08	0.66 \pm 0.04	0.25 \pm 0.09
17	0.24 \pm 0.06	0.08 \pm 0.05	0.55 \pm 0.05	0.46 \pm 0.08	0.03 \pm 0.07	-0.08 \pm 0.07	0.71 \pm 0.06	0.13 \pm 0.06
18	0.08 \pm 0.07	0.15 \pm 0.05	0.59 \pm 0.05	0.41 \pm 0.10	0.22 \pm 0.08	-0.01 \pm 0.06	0.70 \pm 0.07	0.05 \pm 0.08
19	0.15 \pm 0.07	0.11 \pm 0.05	0.76 \pm 0.04	0.33 \pm 0.16	0.22 \pm 0.09	-0.02 \pm 0.05	0.78 \pm 0.04	0.18 \pm 0.07
20	0.11 \pm 0.06	0.03 \pm 0.05	0.79 \pm 0.06	0.28 \pm 0.08	0.12 \pm 0.09	0.04 \pm 0.06	0.71 \pm 0.05	0.29 \pm 0.06
21	0.10 \pm 0.06	0.00 \pm 0.06	0.71 \pm 0.06	0.41 \pm 0.10	0.17 \pm 0.09	0.04 \pm 0.06	0.62 \pm 0.07	0.21 \pm 0.08
22	0.29 \pm 0.07	0.13 \pm 0.06	0.63 \pm 0.04	0.55 \pm 0.14	0.01 \pm 0.06	0.06 \pm 0.06	0.70 \pm 0.06	0.15 \pm 0.06
23	0.22 \pm 0.06	0.20 \pm 0.07	0.68 \pm 0.05	0.37 \pm 0.08	0.11 \pm 0.07	0.07 \pm 0.05	0.68 \pm 0.07	0.46 \pm 0.09
24	0.24 \pm 0.07	0.21 \pm 0.07	0.64 \pm 0.04	0.36 \pm 0.08	0.14 \pm 0.06	0.04 \pm 0.07	0.82 \pm 0.06	0.46 \pm 0.08
25	0.20 \pm 0.07	0.30 \pm 0.07	0.50 \pm 0.04	0.37 \pm 0.07	0.02 \pm 0.06	0.09 \pm 0.07	0.80 \pm 0.08	0.57 \pm 0.09

Supplementary table 5.4. (continued) Genetic correlations (+standard errors) between final cumulative feed conversion ratio (DCFCR42) and average daily gain (ADG), body weight (BW), daily cumulative feed conversion ratio (DCFCR), and daily feed intake (DFI).

	pHu+				pHu-			
	ADG	BW	DCFCR	DFI	ADG	BW	DCFCR	DFI
26	0.18 ± 0.06	0.27 ± 0.06	0.51 ± 0.03	0.33 ± 0.08	0.17 ± 0.06	0.09 ± 0.09	0.83 ± 0.06	0.66 ± 0.07
27	0.07 ± 0.07	0.27 ± 0.06	0.49 ± 0.03	0.25 ± 0.07	0.08 ± 0.06	0.06 ± 0.09	0.86 ± 0.07	0.66 ± 0.09
28	0.04 ± 0.09	0.25 ± 0.06	0.53 ± 0.03	0.50 ± 0.06	-0.14 ± 0.06	0.07 ± 0.08	0.85 ± 0.07	0.72 ± 0.07
29	0.03 ± 0.08	0.25 ± 0.06	0.66 ± 0.04	0.50 ± 0.09	-0.11 ± 0.06	0.08 ± 0.07	0.86 ± 0.06	0.51 ± 0.09
30	0.13 ± 0.08	0.22 ± 0.08	0.68 ± 0.02	0.31 ± 0.08	-0.23 ± 0.12	0.02 ± 0.06	0.92 ± 0.06	0.66 ± 0.10
31	0.06 ± 0.08	0.22 ± 0.08	0.77 ± 0.02	0.43 ± 0.11	-0.22 ± 0.07	0.03 ± 0.06	0.91 ± 0.04	0.50 ± 0.12
32	-0.02 ± 0.09	0.22 ± 0.08	0.76 ± 0.02	0.27 ± 0.12	-0.23 ± 0.09	0.00 ± 0.06	0.92 ± 0.06	0.36 ± 0.09
33	0.12 ± 0.07	0.21 ± 0.09	0.73 ± 0.02	0.28 ± 0.12	-0.37 ± 0.08	-0.01 ± 0.06	0.91 ± 0.05	0.46 ± 0.09
34	-0.02 ± 0.09	0.19 ± 0.10	0.82 ± 0.01	0.64 ± 0.09	-0.27 ± 0.09	-0.06 ± 0.06	0.94 ± 0.04	0.52 ± 0.07
35	0.04 ± 0.08	0.17 ± 0.10	0.81 ± 0.01	0.40 ± 0.08	-0.32 ± 0.09	-0.09 ± 0.08	0.94 ± 0.04	0.40 ± 0.07
36	0.10 ± 0.08	0.15 ± 0.12	0.81 ± 0.01	0.34 ± 0.09	-0.30 ± 0.12	-0.09 ± 0.07	0.96 ± 0.04	0.53 ± 0.14
37	-0.09 ± 0.13	0.18 ± 0.09	0.88 ± 0.01	0.57 ± 0.09	-0.61 ± 0.09	-0.11 ± 0.08	0.97 ± 0.03	0.55 ± 0.09
38	0.08 ± 0.13	0.17 ± 0.12	0.93 ± 0.01	0.44 ± 0.09	-0.44 ± 0.09	-0.14 ± 0.07	0.98 ± 0.03	0.34 ± 0.07
39	-0.12 ± 0.07	0.16 ± 0.12	0.95 ± 0.01	0.57 ± 0.09	-0.28 ± 0.08	-0.16 ± 0.06	0.99 ± 0.02	0.25 ± 0.07
40	-0.37 ± 0.08	0.17 ± 0.10	0.98 ± 0.01	0.70 ± 0.07	-0.59 ± 0.11	-0.12 ± 0.07	0.99 ± 0.01	0.41 ± 0.08
41		0.17 ± 0.09	0.98 ± 0.01	0.15 ± 0.07		-0.12 ± 0.08	0.99 ± 0.01	0.18 ± 0.08
42		0.16 ± 0.09	1.00 ± 0.01	0.41 ± 0.10		-0.13 ± 0.08	1.00 ± 0.02	0.26 ± 0.12

Supplementary table 5.5. Genetic correlations (\pm standard errors) between pHu and average daily gain (ADG), body weight (BW), daily cumulative feed conversion ratio (DCFCR), and daily feed intake (DFI).

	ADG	pHu+ BW	CFCR	DFI	ADG	BW	pHu- CFCR	DFI
3								
4		-0.21 \pm 0.06		0.38 \pm 0.10		0.24 \pm 0.08		-0.01 \pm 0.12
5	0.33 \pm 0.07	0.07 \pm 0.09	-0.25 \pm 0.19	-0.45 \pm 0.08	0.07 \pm 0.09	0.13 \pm 0.05	0.04 \pm 0.12	0.12 \pm 0.12
6	-0.16 \pm 0.07	-0.02 \pm 0.07	0.05 \pm 0.13	-0.52 \pm 0.08	-0.06 \pm 0.17	0.12 \pm 0.11	0.49 \pm 0.12	0.30 \pm 0.08
7	-0.59 \pm 0.06	-0.26 \pm 0.07	0.17 \pm 0.12	-0.41 \pm 0.11	0.01 \pm 0.09	0.03 \pm 0.06	0.72 \pm 0.12	0.41 \pm 0.10
8	-0.38 \pm 0.08	-0.13 \pm 0.08	0.18 \pm 0.06	-0.81 \pm 0.07	0.03 \pm 0.11	0.01 \pm 0.06	0.86 \pm 0.12	0.60 \pm 0.09
9	-0.37 \pm 0.07	-0.47 \pm 0.07	0.38 \pm 0.05	-0.66 \pm 0.11	0.10 \pm 0.08	0.05 \pm 0.06	0.77 \pm 0.11	0.32 \pm 0.09
10	-0.25 \pm 0.07	-0.47 \pm 0.08	-0.12 \pm 0.04	-0.31 \pm 0.08	0.17 \pm 0.12	0.06 \pm 0.08	0.86 \pm 0.13	0.27 \pm 0.11
11	0.07 \pm 0.06	-0.27 \pm 0.06	-0.45 \pm 0.08	-0.48 \pm 0.11	0.17 \pm 0.13	0.13 \pm 0.09	0.75 \pm 0.18	0.01 \pm 0.09
12	-0.20 \pm 0.07	-0.33 \pm 0.08	-0.46 \pm 0.13	-0.66 \pm 0.09	0.02 \pm 0.09	0.08 \pm 0.09	0.67 \pm 0.11	0.25 \pm 0.09
13	-0.22 \pm 0.07	0.00 \pm 0.07	-0.63 \pm 0.11	-0.71 \pm 0.09	-0.05 \pm 0.06	0.08 \pm 0.08	0.61 \pm 0.10	0.27 \pm 0.06
14	-0.14 \pm 0.05	-0.05 \pm 0.08	-0.53 \pm 0.08	-0.47 \pm 0.07	-0.17 \pm 0.06	0.02 \pm 0.09	0.75 \pm 0.07	0.46 \pm 0.13
15	-0.32 \pm 0.06	-0.14 \pm 0.07	-0.55 \pm 0.06	-0.23 \pm 0.18	-0.26 \pm 0.06	-0.05 \pm 0.06	0.44 \pm 0.10	0.09 \pm 0.16
16	-0.38 \pm 0.07	-0.17 \pm 0.07	-0.49 \pm 0.05	-0.07 \pm 0.14	0.17 \pm 0.07	-0.06 \pm 0.08	0.54 \pm 0.06	0.09 \pm 0.12
17	-0.27 \pm 0.05	-0.10 \pm 0.07	-0.33 \pm 0.09	-0.43 \pm 0.07	0.17 \pm 0.07	-0.06 \pm 0.07	0.50 \pm 0.08	0.20 \pm 0.05
18	-0.13 \pm 0.06	-0.19 \pm 0.06	-0.32 \pm 0.12	-0.35 \pm 0.07	0.42 \pm 0.07	0.04 \pm 0.07	0.47 \pm 0.09	0.26 \pm 0.09
19	-0.21 \pm 0.06	-0.15 \pm 0.06	-0.56 \pm 0.12	-0.26 \pm 0.05	0.38 \pm 0.06	0.03 \pm 0.07	0.58 \pm 0.07	0.45 \pm 0.06
20	-0.17 \pm 0.05	-0.07 \pm 0.06	-0.56 \pm 0.13	-0.28 \pm 0.08	0.17 \pm 0.06	0.08 \pm 0.07	0.58 \pm 0.09	0.29 \pm 0.07
21	-0.19 \pm 0.06	-0.07 \pm 0.06	-0.45 \pm 0.11	-0.44 \pm 0.10	0.23 \pm 0.07	0.10 \pm 0.06	0.44 \pm 0.12	0.23 \pm 0.06
22	-0.37 \pm 0.06	-0.22 \pm 0.05	-0.38 \pm 0.09	-0.48 \pm 0.11	0.06 \pm 0.06	0.14 \pm 0.05	0.49 \pm 0.11	0.02 \pm 0.07
23	-0.25 \pm 0.06	-0.28 \pm 0.05	-0.43 \pm 0.13	-0.29 \pm 0.09	0.20 \pm 0.05	0.16 \pm 0.05	0.48 \pm 0.11	0.45 \pm 0.09
24	-0.33 \pm 0.06	-0.31 \pm 0.05	-0.36 \pm 0.12	-0.31 \pm 0.08	0.34 \pm 0.05	0.11 \pm 0.05	0.55 \pm 0.10	0.40 \pm 0.07
25	-0.31 \pm 0.05	-0.38 \pm 0.05	-0.21 \pm 0.10	-0.41 \pm 0.08	0.26 \pm 0.05	0.19 \pm 0.04	0.44 \pm 0.11	0.53 \pm 0.07

Supplementary table 5.5 (continued). Genetic correlations (+standard errors) between pHu and average daily gain (ADG), body weight (BW), daily cumulative feed conversion ratio (DCFCR), and daily feed intake (DFI).

	pHu+				pHu-			
	ADG	BW	CFCR	DFI	ADG	BW	CFCR	DFI
26	-0.24 ± 0.05	-0.36 ± 0.05	-0.21 ± 0.10	-0.24 ± 0.07	0.37 ± 0.05	0.23 ± 0.06	0.47 ± 0.08	0.66 ± 0.09
27	-0.15 ± 0.06	-0.37 ± 0.05	-0.15 ± 0.09	-0.16 ± 0.10	0.22 ± 0.06	0.21 ± 0.05	0.47 ± 0.11	0.48 ± 0.10
28	-0.07 ± 0.07	-0.35 ± 0.05	-0.17 ± 0.09	-0.43 ± 0.12	0.01 ± 0.06	0.22 ± 0.05	0.43 ± 0.13	0.46 ± 0.07
29	0.01 ± 0.07	-0.34 ± 0.05	-0.38 ± 0.12	-0.49 ± 0.09	0.09 ± 0.06	0.23 ± 0.05	0.46 ± 0.12	0.45 ± 0.09
30	-0.15 ± 0.07	-0.32 ± 0.05	-0.38 ± 0.07	-0.21 ± 0.07	0.11 ± 0.13	0.19 ± 0.05	0.49 ± 0.14	0.63 ± 0.11
31	-0.10 ± 0.08	-0.29 ± 0.05	-0.51 ± 0.09	-0.35 ± 0.09	0.09 ± 0.07	0.21 ± 0.05	0.48 ± 0.11	0.42 ± 0.14
32	0.09 ± 0.08	-0.30 ± 0.05	-0.51 ± 0.09	-0.27 ± 0.07	0.17 ± 0.07	0.21 ± 0.05	0.48 ± 0.13	0.44 ± 0.10
33	-0.13 ± 0.08	-0.30 ± 0.05	-0.41 ± 0.11	-0.11 ± 0.09	-0.11 ± 0.07	0.20 ± 0.05	0.53 ± 0.13	0.53 ± 0.11
34	0.03 ± 0.08	-0.26 ± 0.06	-0.60 ± 0.08	-0.58 ± 0.08	-0.01 ± 0.08	0.19 ± 0.05	0.51 ± 0.10	0.50 ± 0.06
35	0.10 ± 0.08	-0.25 ± 0.07	-0.56 ± 0.09	-0.25 ± 0.08	-0.07 ± 0.08	0.14 ± 0.06	0.53 ± 0.11	0.37 ± 0.11
36	-0.02 ± 0.08	-0.24 ± 0.07	-0.51 ± 0.11	-0.11 ± 0.10	-0.06 ± 0.10	0.14 ± 0.06	0.57 ± 0.11	0.45 ± 0.18
37	0.24 ± 0.14	-0.24 ± 0.06	-0.64 ± 0.11	-0.45 ± 0.09	-0.23 ± 0.09	0.11 ± 0.07	0.60 ± 0.11	0.47 ± 0.12
38	0.11 ± 0.12	-0.22 ± 0.08	-0.73 ± 0.10	-0.42 ± 0.10	-0.24 ± 0.08	0.10 ± 0.06	0.56 ± 0.09	0.21 ± 0.10
39	0.25 ± 0.10	-0.20 ± 0.06	-0.78 ± 0.10	-0.63 ± 0.08	-0.09 ± 0.07	0.07 ± 0.06	0.55 ± 0.09	0.13 ± 0.06
40	0.58 ± 0.08	-0.19 ± 0.06	-0.82 ± 0.10	-0.77 ± 0.08	-0.56 ± 0.10	0.07 ± 0.06	0.55 ± 0.07	0.23 ± 0.08
41		-0.18 ± 0.06	-0.86 ± 0.08	0.05 ± 0.09		0.06 ± 0.06	0.59 ± 0.05	0.02 ± 0.08
42		-0.14 ± 0.06	-0.89 ± 0.06	-0.45 ± 0.08		0.04 ± 0.06	0.71 ± 0.05	0.24 ± 0.17

Supplementary table 5.6. Genetic correlations (\pm standard errors) between *BMY* and daily cumulative feed conversion ratio (*DCFCR*).

Age (d)	pHu+	pHu-	Age (d)	pHu+	pHu-
5	0.24 \pm 0.19	0.00 \pm 0.14	24	0.56 \pm 0.07	0.11 \pm 0.06
6	0.26 \pm 0.16	0.03 \pm 0.12	25	0.47 \pm 0.07	0.10 \pm 0.07
7	0.35 \pm 0.16	-0.04 \pm 0.13	26	0.46 \pm 0.06	0.11 \pm 0.07
8	0.33 \pm 0.07	0.21 \pm 0.12	27	0.63 \pm 0.06	0.12 \pm 0.07
9	0.42 \pm 0.07	0.22 \pm 0.12	28	0.62 \pm 0.06	0.09 \pm 0.09
10	0.31 \pm 0.07	0.22 \pm 0.13	29	0.54 \pm 0.07	0.08 \pm 0.07
11	0.30 \pm 0.06	0.28 \pm 0.12	30	0.51 \pm 0.06	0.09 \pm 0.09
12	0.21 \pm 0.08	0.39 \pm 0.09	31	0.42 \pm 0.07	0.08 \pm 0.12
13	0.11 \pm 0.08	0.32 \pm 0.10	32	0.44 \pm 0.07	0.04 \pm 0.13
14	0.21 \pm 0.08	0.27 \pm 0.09	33	0.55 \pm 0.07	0.04 \pm 0.10
15	0.39 \pm 0.06	0.21 \pm 0.09	34	0.36 \pm 0.08	0.07 \pm 0.11
16	0.20 \pm 0.05	0.21 \pm 0.09	35	0.40 \pm 0.08	0.01 \pm 0.13
17	0.45 \pm 0.06	0.27 \pm 0.09	36	0.35 \pm 0.08	0.04 \pm 0.12
18	0.60 \pm 0.05	0.29 \pm 0.06	37	0.31 \pm 0.07	0.06 \pm 0.13
19	0.38 \pm 0.06	0.23 \pm 0.06	38	0.26 \pm 0.08	0.05 \pm 0.13
20	0.46 \pm 0.06	0.28 \pm 0.07	39	0.24 \pm 0.09	0.06 \pm 0.14
21	0.49 \pm 0.06	0.20 \pm 0.09	40	0.17 \pm 0.09	0.04 \pm 0.12
22	0.51 \pm 0.06	0.12 \pm 0.08	41	0.09 \pm 0.07	0.06 \pm 0.11
23	0.48 \pm 0.07	0.10 \pm 0.08	42	0.03 \pm 0.03	0.07 \pm 0.10



Quentin BERGER



Impact de l'introduction en sélection de nouveaux critères d'efficacité alimentaire sur la durabilité de la production du poulet de chair

Résumé en français

Face à une demande mondiale en forte augmentation, la filière de production du poulet de chair doit réduire son impact environnemental en permettant aux animaux d'être efficaces lorsqu'ils sont nourris avec des matières premières locales et moins en concurrence avec l'alimentation humaine. Les travaux de thèse, reposant sur un phénotypage à haut-débit de l'efficacité alimentaire, montrent une bonne capacité d'adaptation à ce type de régime alternatif, pour des génétiques à croissance rapide et à croissance lente. Les données acquises au sein de deux lignées de poulets à croissance rapide ont révélé une diversité de profils cinétiques d'efficacité alimentaire, à la fois phénotypique et génétique. La simulation de différentes stratégies montre que des gains significatifs peuvent être attendus de l'utilisation des régimes alternatifs et de la sélection des animaux sur l'efficacité alimentaire avec ces régimes. Cette simulation met aussi en évidence que les stratégies à adopter et les réponses sur les fonctions productives (quantité et qualité de la viande) varient selon la souche considérée.

Mots-clés : poulet, efficacité alimentaire, durabilité, génétique

Résumé en anglais

In order to meet a rapidly increasing global demand, the broiler production chain has to reduce its environmental impact by allowing animals to be efficient when fed with local raw materials, less in competition with human food. This thesis work, based on high throughput phenotyping of feed efficiency, shows a good adaptability to this type of alternative diet, both for fast and slow growing genotypes. Data acquired in two fast-growing chicken lines revealed a phenotypic and genetic diversity of feed efficiency kinetic profiles. Simulation of different strategies shows that significant gains can be expected from the use of alternative diets and from animal selection on feed efficiency with these diets. This simulation also shows that the strategies to be adopted and the responses on the productive functions (meat quantity and quality) vary according to the strain considered.

Keywords: chicken, feed efficiency, sustainability, genetics