

Bénéfices et contraintes de la sélection génétique du poulet de chair pour une croissance rapide

B. CARRÉ¹, B. MÉDA¹, H. JUIN²

¹ INRA, UR83 Recherches Avicoles, F-37380 Nouzilly, France

² INRA, UE1206 EASM, Le Magneraud, F-17700 Surgères, France

Courriel : Bernard.Carre@tours.inra.fr

Combinant la modélisation et les données expérimentales de la littérature scientifique, le présent article établit un tableau de la sélection génétique du poulet de chair pouvant aider à la construction des stratégies à développer en génétique et alimentation.

L'amélioration de la productivité des animaux d'élevage par sélection génétique s'est avérée très efficace durant le siècle dernier, particulièrement chez les espèces à taux de reproduction élevé comme le poulet. Concernant le poulet de chair, l'accélération de la vitesse de croissance a été un des moyens utilisés dans cette amélioration.

La vitesse de croissance est souvent exprimée par l'âge au moment de l'abattage à un poids donné. Quand bien même il serait difficile de définir une limite biologique à cet âge d'abattage, il semble évident qu'une telle limite existe. Quelle que soit cette limite, il est probable qu'elle sera atteinte selon un processus asymptotique caractérisé par une augmentation des difficultés à l'approche de cette limite. La production avicole a déjà fait l'expérience de telles difficultés avec l'apparition de problèmes physiologiques associés à la locomotion ou aux systèmes respiratoires et cardiovasculaires. La sélection génétique s'est montrée capable de réduire en partie ces problèmes en changeant la conformation des pattes et en appliquant une sélection spécifique contre certains syndromes physiologiques comme l'ascite (accumulation de liquide dans la cavité abdominale).

Ces difficultés émergentes pourraient donc laisser suggérer que la sélection du poulet de chair pour une croissance de plus en plus rapide devrait être arrêtée du fait d'un coût de plus en plus élevé. S'il paraît difficile d'estimer ce surcoût pour le futur, le manque à gagner d'un arrêt de cette sélection est, quant à lui, quantifiable. Le présent article se propose d'abord de quantifier le gain attendu d'une poursuite de la sélection pour une croissance rapide chez le poulet de chair

à l'aide d'une modélisation exprimant la consommation alimentaire en fonction de la vitesse de croissance et des caractéristiques de l'aliment. A l'aide de cette modélisation, nous décrivons ensuite l'augmentation des contraintes concernant la qualité de l'aliment.

Enfin, nous présentons les données relatives aux contraintes physiologiques grandissantes de la sélection du poulet de chair vues sous l'aspect de la taille des organes, en prenant l'exemple des organes digestifs.

1 / Bénéfices associés à une sélection du poulet de chair pour une croissance de plus en plus rapide

L'accélération de la croissance du poulet de chair par sélection génétique a été conduite depuis au moins soixante-dix années. Ces sélections, le plus souvent réalisées par des compagnies spécialisées travaillant à l'échelle mondiale, ont abouti à des accélérations de croissance prononcées avec, par exemple, une multiplication par environ 2,3 du poids des animaux à 35 jours d'âge en une quarantaine d'années entre les années 1960 et 2000 (Ellison 1965, Biely et March 1967, Rosenberg *et al* 1967, Lemme *et al* 2006). L'augmentation de la vitesse de croissance s'est évidemment accompagnée d'une amélioration de productivité exprimée, par exemple, par la diminution de l'Indice de Consommation (IC) (consommation d'aliment/gain de poids). Toutefois, l'estimation précise de cette diminution due au seul fait de la sélection sur la vitesse de croissance est difficile à évaluer à partir de la littérature étant donné

que la sélection du poulet de chair n'a pas seulement porté sur la vitesse de croissance. Des sélections sur d'autres critères comme les diminutions de l'engraissement ou de la consommation résiduelle (mesure de la consommation indépendamment du poids et du gain de poids) ont pu être menées conjointement et également influencer sur l'évolution de l'IC. En revanche, les techniques de formulation des acides aminés et des protéines dans l'aliment ont pu varier et induire aussi des changements dans la valeur de l'IC.

Dans de telles situations complexes, l'utilisation de modèles peut permettre d'isoler les facteurs responsables afin d'en estimer l'influence. Grâce à un système de six équations récemment établi sur la base des données de la littérature (Carré et Méda 2015), nous allons ici utiliser un modèle de calcul de la consommation alimentaire (tableau 1) capable d'isoler l'effet de la vitesse de croissance sur l'IC.

Dans ce modèle, le coefficient α donné pour le calcul du dépôt lipidique (tableau 1) est celui que l'on obtient sur la base des données actuelles observées chez des mâles à croissance rapide. Les vitesses de croissance sont exprimées dans ce modèle par des courbes de croissance calculées. Ces courbes sont établies à partir d'une courbe de Gompertz (G_{34}) calculées d'après une courbe expérimentale où les animaux atteignaient 2,5 kg à 34 jours. Pour une courbe calculée où le poids de 2,5 kg doit être atteint au jour J, deux déformations de G_{34} sont effectuées, l'une verticale, l'autre horizontale, chacune aboutissant à un poids de 2,5 kg au jour J ; ensuite on effectue la moyenne de ces deux dernières courbes.

Tableau 1. Modèle utilisé pour le calcul des conséquences générées par l'augmentation de la vitesse de croissance du poulet de chair.

<p>Mode de calcul Système de 6 équations (Carré et Méda 2015) modulé en fonction du génotype « mâle à croissance rapide » : Coefficient α du dépôt lipidique : 14,5. Equation de la teneur protéique du gain de poids : type « mâle à croissance rapide ».</p>
<p>Données entrantes Courbes de croissance déduites du modèle de Gompertz avec des jours d'abattage différents pour un poids final constant de 2,5 kg. 3 régimes à valeur énergétique (EMAn « poulet de chair ») de 2815, 2925 et 3080 kcal/kg pour les périodes de démarrage (éclosion-300g), croissance (300-1200g) et finition (1200-2500g), respectivement. Efficacités protéiques Scénario 1 : efficacité protéique de 0,60 au dernier jour des périodes de démarrage et de croissance et au 5^{ème} jour de la finition. Scénario 2 : efficacité protéique idem au scénario 1 pour l'abattage à 34 jours, puis augmentation de 0,0075 pour chaque diminution d'une journée à l'abattage.</p>
<p>Données sortantes calculées Concentration protéique des aliments. Indices de consommation, journallement et globalement. Efficacités protéiques, journallement et globalement. Teneur lipidique de l'animal entier, journallement. Ratios des gains de poids et consommations sur le poids vif, journallement.</p>

Dans ce modèle, les teneurs protéiques alimentaires sont calculées sur des jours de référence précis : les derniers jours des périodes de démarrage et de croissance et le 5^{ème} jour de la période de finition (tableau 1). Deux scénarios différents sont considérés. Le scénario 1 suppose que les besoins en acides aminés sont couverts, que la concentration alimentaire du 1^{er} acide aminé limitant est ajustée au besoin et que les ratios du 1^{er} acide aminé limitant sur les protéines sont relativement constants (pour un acide aminé donné), résultant en une efficacité protéique peu variable proche de 60%. Le scénario 2 est utilisé pour une pro-

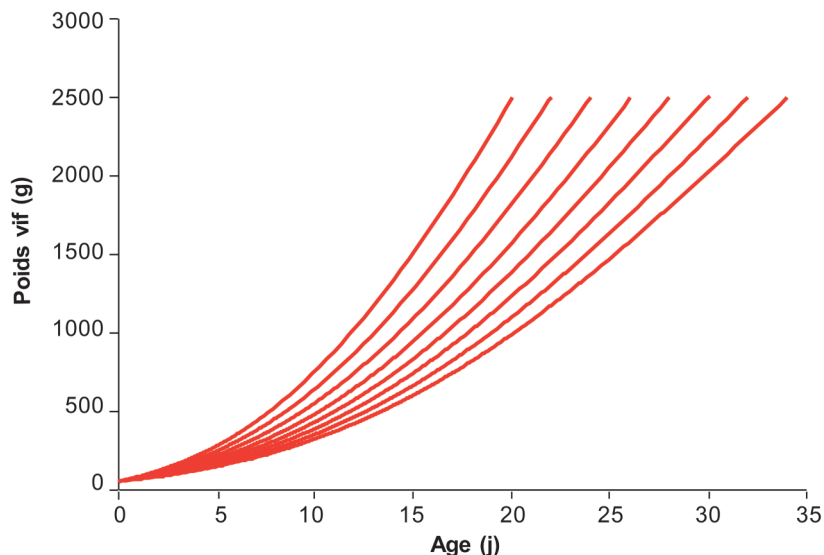
jection dans le futur. Les présupposés sur les acides aminés sont les mêmes que dans le scénario 1 à l'exception des ratios du 1^{er} acide aminé limitant sur les protéines. Le scénario 2 suppose une élévation régulière de ce ratio, qui se traduit par une augmentation de 0,0075 dans la valeur de l'efficacité protéique pour chaque diminution d'une journée à l'abattage effectué à 2,5 kg de poids vif.

Ce modèle a d'abord été utilisé pour estimer l'évolution de l'indice de consommation résultant de l'accélération de la croissance obtenue par la sélection génétique durant les 40 années écoulées des

années 1960 aux années 2000. Le calcul est effectué pour un abattage à 2 kg obtenu soit à 60 jours (années 1960), soit à 30 jours (années 2000). Les courbes de croissance sont obtenues comme décrit plus haut en se fixant sur le poids de 2 kg et non de 2,5 kg. En appliquant le scénario 1 qui suppose des ratios (acides aminés / protéines) relativement constants, on obtient des indices de consommation de 2,64 et 1,39 pour les années 1960 et 2000, respectivement, soit une réduction de 48% de la consommation alimentaire obtenue par la seule sélection sur la vitesse de croissance durant ces 40 années.

Ce gain de productivité considérable est bien supérieur à ce qui peut être obtenu par une sélection sur la maigreur dont le gain attendu est de l'ordre de 10% (Leclercq 1983, Whitehead et Griffin 1984, Leenstra et Cahaner 1991). Qui plus est, les croisements commerciaux actuels étant plutôt de type « maigre » (Kras *et al* 2013a, Carré et Méda 2015), la sélection sur ce critère a peut-être maintenant atteint une limite. Une sélection sur l'efficacité digestive peut aussi être très performante avec un gain d'aliment qui peut atteindre plus de 30% avec des régimes basés sur du blé (de Verdal *et al* 2011b), mais seulement 14% avec des régimes « maïs » (Rougière *et al* 2009). Donc, à notre connaissance, la sélection sur la vitesse de croissance reste encore la méthode de sélection la plus puissante pour améliorer la productivité du poulet de chair.

Pour le futur, on peut estimer le gain attendu de la productivité avec la poursuite de la sélection pour une vitesse

Figure 1. Courbes de croissance théoriques du poulet de chair pour des âges d'abattage allant de 34 à 20 jours et un poids final de 2,5 kg. Les courbes sont calculées d'après un modèle de Gompertz ajusté sur des données expérimentales observées pour l'âge d'abattage de 34 jours.

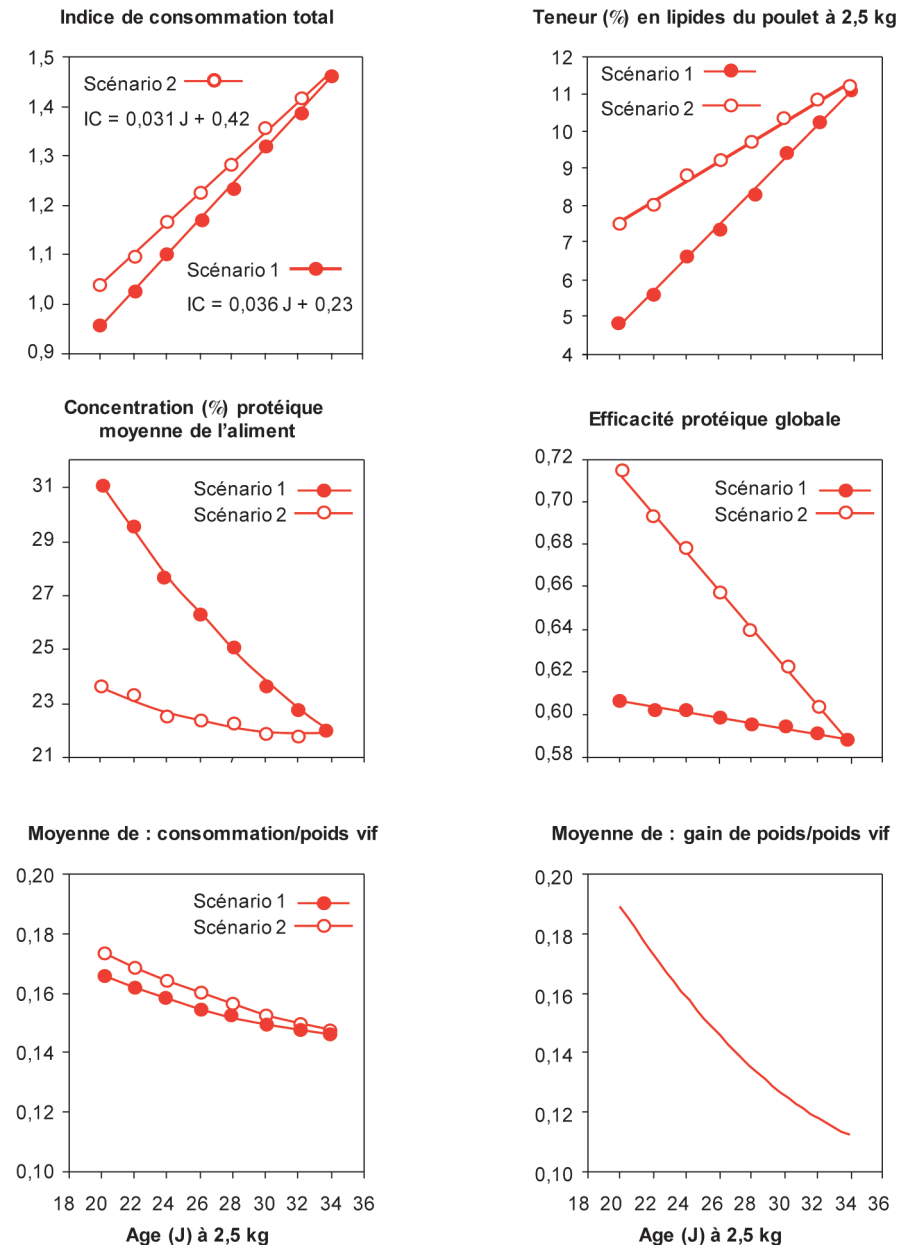
de croissance rapide. Le modèle estime divers paramètres pour une réduction de l'âge d'abattage (2,5 kg de poids vif) de 14 jours, allant de 34 jours (présent) à 20 jours (futur), selon deux scénarios de formulation des acides aminés et protéines (tableau 1), l'un exprimant un ratio (acides aminés/protéines) relativement constant (scénario 1), l'autre exprimant une formulation où ce ratio va en augmentant (scénario 2). Les résultats de cette simulation sont montrés en figure 2, avec les courbes de croissance correspondantes (figure 1). L'indice de consommation est réduit d'une manière linéaire avec la diminution de l'âge d'abattage à raison de 0,036 et 0,031 par jour de réduction dans la durée d'élevage, ce qui revient à des réductions de 35 et 29% de la consommation quand on réduit l'âge d'abattage de 34 à 20 jours, pour les scénarios 1 et 2, respectivement (figure 2). Les efficacités protéiques sont également améliorées, d'une façon modeste pour le scénario 1 et de 22% pour le scénario 2 (figure 2). Cependant, cette dernière amélioration viendrait essentiellement de la formulation des acides aminés, de plus en plus concentrés relativement aux protéines. Les concentrations lipidiques corporelles s'en trouvent réduites très sensiblement (figure 2) du fait des accroissements des protéines alimentaires et de l'efficacité protéique. Ces changements s'accompagnent de modifications dans la formulation qui, eux, peuvent représenter un accroissement de contrainte.

2 / Contraintes alimentaires associées à une sélection du poulet de chair pour une croissance de plus en plus rapide

Dans le cas du scénario 1 qui représente une formulation en acides aminés relativement constante par rapport aux protéines, on peut observer à quel point le taux de protéines alimentaires pourrait augmenter du fait de l'accélération de la croissance. Ce taux protéique augmente ici d'une manière non linéaire, chaque jour gagné supplémentaire se révélant de plus en plus exigeant en matière d'augmentation du taux protéique, au point d'atteindre à la fin un taux moyen de 31%. Des teneurs protéiques aussi élevées exigeraient des taux d'introduction de tourteaux protéiques dépassant largement 40% et l'utilisation de ressources protéiques très concentrées. Or, l'introduction de tourteaux protéiques à des taux élevés représente un risque important de litières humides (Carré *et al* 2013), avec tous les inconvénients sanitaires qui y sont associés. Par ailleurs, le coût de la pro-

Figure 2. Indice de Consommation total (IC), teneur en lipides du poulet à l'abattage (2,5 kg), Concentration Protéique moyenne de l'aliment (CP), Efficacité Protéique (EP) globale, moyenne de la consommation journalière rapportée au poids vif, moyenne du gain journalier rapporté au poids vif, calculés pour des courbes de croissance de plus en plus rapides (figure 1), selon deux scénarios de formulation des acides aminés.

Scénario 1 : EP globale stable proche de 0,60 ; Scénario 2 : EP de plus en plus élevée pour les croissances de plus en plus rapides (gain d'EP de 0,0075 par journée en moins dans la durée d'élevage). Les calculs sont conduits selon le modèle décrit au tableau 1, sur la base des équations publiées par Carré et Méda (2015). IC = consommation rapportée au gain de poids, de l'éclosion à l'abattage (2,5 kg). CP = ratio de la consommation protéique totale sur la consommation totale d'aliment. EP = gain de protéines rapporté à la consommation de protéines



téine s'avère d'autant plus élevée que sa concentration est forte, la concentration exigeant des procédés industriels coûteux.

De plus, il est illusoire de penser que la dilution générale de l'aliment serait un moyen simple d'en réduire le taux protéique car, en toute théorie, un animal exige des concentrations alimentaires d'autant plus élevées que sa vitesse de

croissance est rapide. En effet, le temps de transit moyen dans le tractus digestif est plus ou moins proportionnel au rapport (volume digestif/ingéré quotidien), et donc, aussi, plus ou moins proportionnel au rapport (poids vif/ingéré quotidien). Or, ce dernier rapport va en diminuant avec l'augmentation de la vitesse de croissance (figure 2). Une plus grande vitesse de croissance comporte donc

un risque d'une réduction du temps de transit digestif avec une réduction concomitante des digestibilités (Rougière et Carré 2010). Étant donné qu'une dilution de l'aliment entraîne une augmentation de l'ingéré et, donc, aussi, un risque d'un temps de transit digestif raccourci, il apparaît peu opportun d'accompagner une vitesse de croissance plus rapide d'une dilution alimentaire plus élevée. Le risque est tout simplement que l'animal réduise son ingéré pour assurer un temps de transit constant et, qu'ainsi, ses besoins ne soient pas couverts. L'autre risque est que l'animal accroisse son volume digestif, ce qui, évidemment, se traduirait par une réduction du rendement en viande. La dilution du régime est donc une solution risquée et limitée pour réduire les taux protéiques élevés rencontrés avec les vitesses de croissance les plus rapides.

En fait, les inconvénients du scénario 1 ont toutes les chances de le rendre, à terme, quasi impraticable, ce qui rend le scénario 2 pratiquement obligatoire. En effet, dans le scénario 2, les taux protéiques évoluent beaucoup moins (figure 2), les apports en acides aminés purs ou en « protéines idéales » devenant les principaux acteurs de l'adaptation de l'aliment aux exigences de l'accélération de la croissance. Le seul problème de ce scénario est son manque d'alternative dans la formulation alimentaire, rendant l'industrie alimentaire vulnérable aux aléas concernant la fourniture et les prix des acides aminés purs. Selon ce scénario, le principe d'indépendance sur les acides aminés se substituera de plus en plus au principe d'indépendance sur les protéines.

3 / Contraintes physiologiques associées à une sélection du poulet de chair pour une croissance de plus en plus rapide

Depuis quelques années, des recherches ont été conduites pour comparer les poulets de chair actuels avec d'anciennes lignées non sélectionnées (Schmidt *et al* 2009, Zuidhof *et al* 2014). Une des préoccupations majeure qui en est ressortie est le constat d'une réduction importante de la taille relative des organes chez le poulet de chair moderne avec, par exemple, une réduction de 20% du poids du cœur à un poids vif de 1 kg chez le poulet de chair moderne comparé à l'ancien (Schmidt *et al* 2009). Parallèlement à ces réductions, il est observé une augmentation considérable des rendements en viande avec, par exemple, une proportion de filet presque multipliée par deux chez le poulet de chair moderne

relativement à l'ancien (Schmidt *et al* 2009).

En effet, le poulet de chair n'a pas seulement été sélectionné jusqu'à présent sur la vitesse de croissance. Il a aussi été sélectionné pour un accroissement de son rendement en viande. Certes, la réduction de l'emplumement a probablement permis en partie cette augmentation de rendement. En effet, la sélection génétique de poulets dépourvus de plumes s'accompagne d'une amélioration du rendement en viande (Hadad *et al* 2014). De plus, Cahaner, comme rapporté par Hadad *et al* en 2014, mentionne que les poulets de chair actuels ont un emplumement de 3,5% à l'abattage, alors que Gous *et al* (1999) observaient cet emplumement à un niveau de 5% en 1990. Mais une diminution d'emplumement ne peut compenser à elle seule l'accroissement considérable de la masse musculaire. Nous sommes bien obligés d'admettre que cette amélioration de rendement s'est effectuée aussi au détriment du poids des organes, ce qui a probablement été une des causes des syndromes qui sont apparus tels que l'ascite ou l'arrêt cardiaque.

Cependant, l'association entre fonctions et taille d'organe ne s'opère pas forcément toujours de la même manière. L'étude du tractus digestif va nous en offrir une illustration.

3.1 / Relations entre fonctions physiologiques et taille d'organe. Exemple du tractus digestif

Le tractus digestif s'avère particulièrement intéressant pour l'étude de la fonctionnalité d'un organe. En effet, la mesure du bilan digestif ou « digestibilité » (rapport de la quantité digérée et absorbée sur la quantité ingérée) chez l'animal nourri *ad libitum* offre un moyen facile et précis d'apprécier la fonctionnalité du tractus digestif. Nous disposons maintenant des lignées de poulet D⁺ et D⁻, sélectionnées génétiquement sur leur efficacité digestive. Ces lignées, obtenues à l'Unité de Recherches Avicoles de l'INRA de Tours-Nouzilly dans les années 2000 (Mignon-Grasteau *et al* 2004, de Verdal *et al* 2011a), ont été l'objet de nombreuses études aptes à nous éclairer sur la relation entre taille et fonctionnalité des organes.

Il a été observé que les poulets D⁺ (bons digesteurs) présentaient un plus gros gésier (Péron *et al* 2006, Rougière *et al* 2009, Rougière et Carré 2010, de Verdal *et al* 2011a) et un plus petit poids d'intestin (Rougière *et al* 2009, Rougière et Carré 2010, de Verdal *et al* 2011a) que les D⁻ (mauvais digesteurs). De plus, il a été constaté que les digestibilités

étaient corrélées positivement au poids relatif du gésier et négativement au poids relatif de l'intestin, aussi bien dans la population des D⁺ et D⁻ que dans une population de poulets de chair provenant de croisements génétiques commerciaux (Carré *et al* 2010 ; voir aussi la figure 3). La réduction du gésier chez les D⁻ s'accompagne d'une perte de fonctionnalité du dit compartiment (Rougière et Carré 2010, Rougière *et al* 2012) à tel point qu'un processus de « *bypass* » par connexion directe entre l'entrée et la sortie du gésier est envisageable chez les D⁻ (Rideau 2014, communication personnelle). Quant à l'intestin des D⁻, l'augmentation de son poids est associée à une augmentation de la hauteur des villosités de l'épithélium (de Verdal *et al* 2010). Toutes ces données nous conduisent à proposer que la relation entre poids et fonctionnalité ne s'effectue pas de la même manière pour le gésier et l'intestin. L'augmentation de poids correspond pour le premier à une amélioration de la fonctionnalité, et, pour le second, à une adaptation à un problème d'efficacité du système.

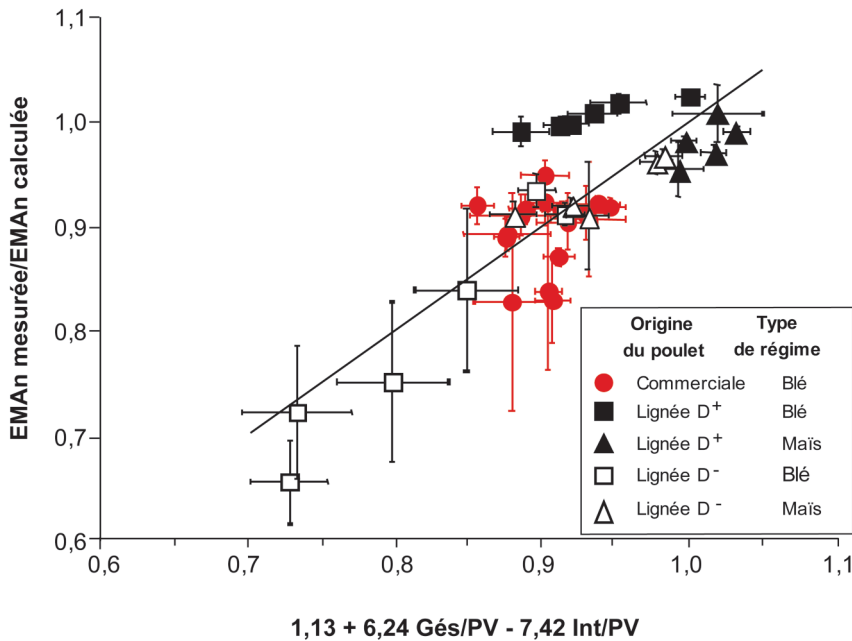
Ces constats vont nous permettre d'interpréter ce qui s'est passé pour le tractus digestif des poulets de chair dans le processus de leur sélection.

a) L'estomac (gésier et proventricule) des poulets de chair à croissance rapide

L'estomac des oiseaux est constitué de deux compartiments, le proventricule et le gésier. Le premier, généralement le plus petit, est la partie sécrétrice, le second assurant la fonction de broyage avec sa couche musculuse développée. Deux études (Kadhim *et al* 2010, Kras *et al* 2013b) ont montré que, à poids vif équivalent, le poids du gésier était plus faible chez des poulets de chair commerciaux actuels que chez des poulets à croissance lente. La même observation a été faite dans nos laboratoires en utilisant dans la comparaison des poulets D⁺ à la place des poulets à croissance lente (Carré *et al* 2014). Sachant que les poulets à croissance lente tels que les poulets « Label Rouge » sont assimilables à des D⁺ (Carré *et al* 2008), notre étude (Carré *et al* 2014) se trouve relativement équivalente à celle de Kras *et al* (2013b). En terme d'efficacité digestive, les D⁺ sont équivalents à des « Label Rouge », mais sont supérieurs à des poulets de chair commerciaux (Carré *et al* 2008). Une meilleure efficacité digestive des « Label Rouge » comparée aux poulets de chair commerciaux a également été observée par Kras *et al* (2013b).

Lorsque l'on examine l'ensemble de ces résultats concernant l'efficacité digestive et la taille du gésier, tout indique que les poulets de chair commerciaux

Figure 3. Régression multiple exprimant l'énergie métabolisable (EMAn) du régime mesurée rapportée à l'EMAn calculée (valeur de table alimentaire), en fonction des poids vides du Gésier (Gés) et de l'intestin grêle (Int) rapportés au Poids Vif (PV), chez le poulet de chair en croissance.



Les données sont celles de Carré *et al* (2005a, 2005b), Péron *et al* (2005), Garcia *et al* (2007), Rougière *et al* (2009), Rougière et Carré (2010). Un point correspond à la moyenne d'un traitement (+/- Ecart type de la moyenne). $R^2 = 0,67$; $n = 40$. Signification statistique P des coefficients = 0,0001.

présentent une taille de gésier réduite et qu'ils s'en trouvent probablement affectés par une efficacité digestive diminuée par rapport à un optimum attendu. Il ne serait pas surprenant que la sélection pour l'accroissement musculaire se soit effectuée en partie au détriment du poids du gésier avec, pour conséquence, une efficacité de rendement digestif inférieure à l'optimum.

Cependant, la taille du gésier n'a pas seulement des liens avec les rendements musculaire et digestif. Si la réduction de la taille du gésier présente un inconvénient pour l'efficacité de la digestion, il se pourrait qu'elle soit plutôt un avantage sur d'autres fonctions essentielles. Curieusement, il a été observé une meilleure solidité osseuse chez les D⁺ que chez les D⁻ malgré une faible corrélation génétique entre efficacité digestive et solidité osseuse (de Verdal *et al* 2013). Durant la sélection des D⁺ et D⁻, nous avons plusieurs fois observé des problèmes locomoteurs chez les D⁺ entraînant l'élimination des animaux affectés, ce qui a probablement résulté en une meilleure solidité osseuse chez les D⁺. On peut émettre l'hypothèse que le gros gésier des D⁺ a entraîné un déplacement du centre de gravité de ces animaux vers l'avant avec, pour conséquence, un risque plus élevé de désordre locomoteur (Corr *et al* 2003a). Ainsi, la sélection pour l'élimination des problèmes locomoteurs chez les poulets de chair commerciaux

pourraient aussi avoir participé à la sélection de gésiers de taille réduite chez ces animaux.

Les problèmes d'ascite sont aussi un autre point à prendre en considération pour expliquer la réduction de l'estomac des poulets de chair commerciaux. En effet, Julian (1993) a suggéré que l'amplitude de la respiration pouvait être limitée par la taille des organes internes, et Jones (1995) a rapporté que le phénomène du proventricule dilaté pouvait avoir un effet particulièrement négatif sur la pression à l'intérieur de la cavité thoracique. Or, ce phénomène de proventricule dilaté a été spécifiquement observé chez les D⁺ mais pas chez les D⁻ (Rougière et Carré 2010). Il ne serait donc pas surprenant que les poulets de chair commerciaux présentent un estomac réduit, similaire à celui des D⁻, également du fait d'une sélection contre les problèmes d'ascite chez les poulets de chair commerciaux.

b) L'intestin des poulets de chair à croissance rapide

Pour ce qui concerne l'intestin, les poulets de chair commerciaux présentent une réduction du poids relatif de cet organe comparativement aux poulets à croissance lente (Kras *et al* 2013b), ce qui va dans le même sens que nos observations qui relatent un poids relatif de l'intestin de poulets de chair commerciaux

inférieurs à celui des D⁻ et équivalents à ceux des D⁺ (Carré *et al* 2014). Chez les poulets de chair commerciaux, le poids relatif de l'intestin se trouve donc plus proche de celui des D⁺, alors que l'inverse s'observe pour leur estomac avec un poids relatif proche de celui des D⁻. Chez les poulets de chair commerciaux, on assiste donc à une réduction du poids relatif des deux organes digestifs, avec cependant des résultats inversés quant à l'efficacité digestive, négatif pour l'estomac, positif pour l'intestin. Du point de vue de la taille des organes digestifs, les poulets de chair commerciaux tiennent donc à la fois des D⁺ et des D⁻. Corrélativement, d'une manière cohérente, l'efficacité digestive des poulets de chair commerciaux se situe entre celles des D⁺ et des D⁻ (Carré *et al* 2008, 2014 ; voir aussi la figure 3).

La réduction du poids des organes observée avec l'accroissement du rendement en viande des poulets de chair à croissance rapide peut donc être associée à des changements d'efficacité fonctionnelle opposés selon l'organe considéré. Ces réductions ne sont donc pas forcément associées à des baisses de fonctionnalité, car elles peuvent être le signe d'une plus grande efficacité permettant au système de s'économiser en réduisant la taille de l'organe. Il est probable que, pour un certain nombre de fonctions, les poulets de chair commerciaux ont évolué de cette manière.

Dans le cas d'une baisse de fonctionnalité d'un organe, le phénomène peut aller jusqu'à une suppression de fonction, comme mentionné plus haut pour le gésier des D⁻. La suppression d'une fonction est possible pour un organe lorsqu'elle n'affecte pas la survie de l'animal ou lorsqu'un autre organe est capable de prendre le relais. La fonction du gésier n'est probablement pas essentielle parce que les hydrolyses enzymatiques y sont limitées et que pratiquement aucune absorption n'a lieu dans ce compartiment. De plus, sa perte de fonction peut probablement être compensée en partie par une augmentation des sécrétions pancréatiques et une amélioration des fonctions intestinales. Il est possible que la petite taille du cœur des poulets de chair commerciaux (Schmidt *et al* 2009), qui implique un rythme basal important (Faure et Ricard 1980), soit aussi associée à la suppression d'une fonction, à savoir l'accélération rythmique nécessaire à la réaction d'urgence impliquant une brusque activité physique (Corr *et al* 2003b).

3.2 / Relations entre consommation alimentaire et taille d'organe. Exemple du tractus digestif

Les organes viscéraux affectés à la fonction de nutrition comme le tractus

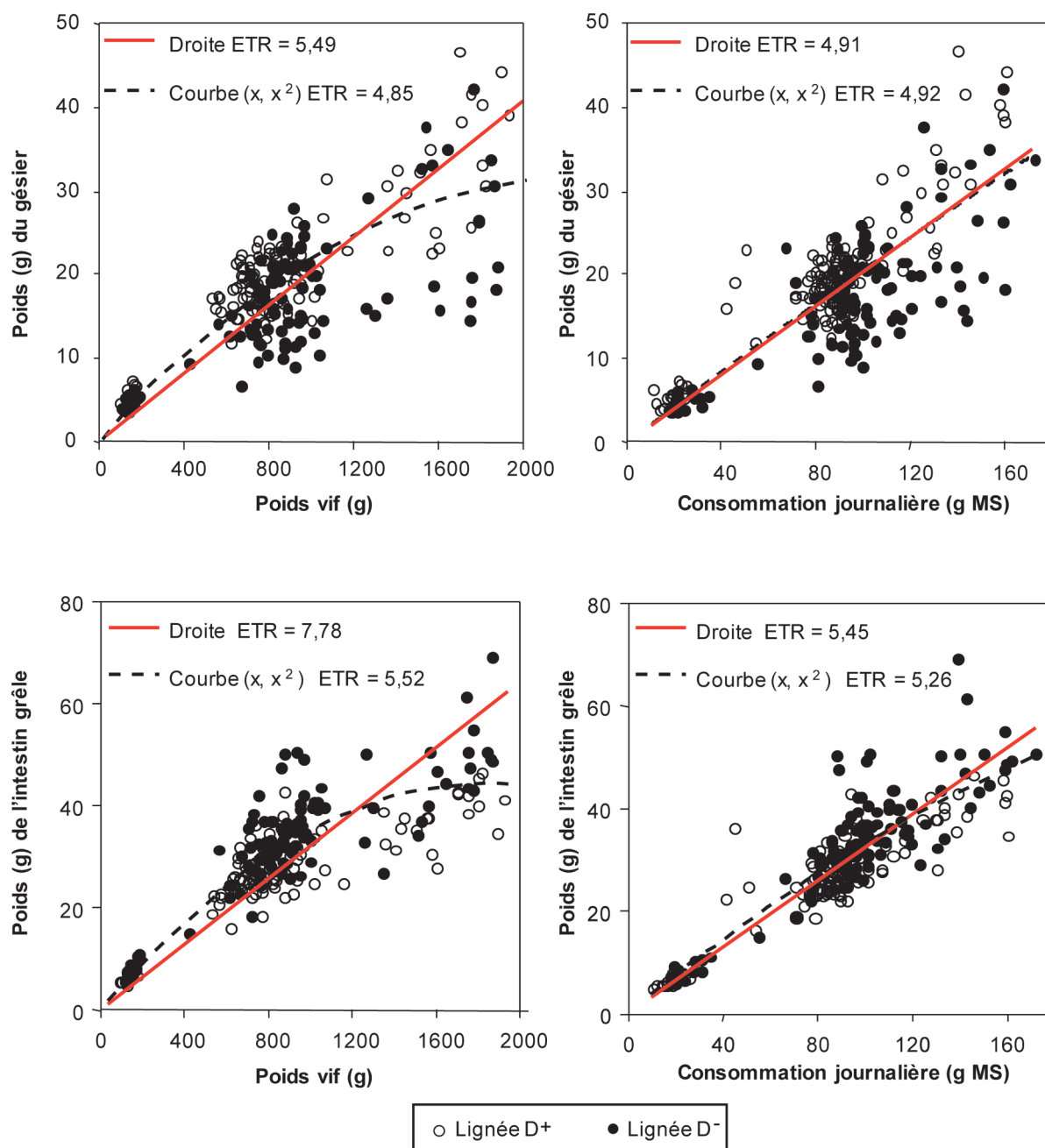
digestif, le foie, les systèmes respiratoires, cardiovasculaires ou urinaires, présentent probablement une taille en rapport avec les flux qu'ils ont à traiter. Ce facteur de flux est à différencier de l'efficacité. En effet, à efficacité donnée, on peut supposer qu'un organe grossisse si son flux à traiter augmente. De tels flux peuvent représenter la consommation journalière d'oxygène, la production journalière de dioxyde de carbone, la quantité journalière de glucose transporté, etc. Quelle que soit leur nature chimique ou physique, ces flux sont probablement plus ou moins

proportionnels à la consommation journalière d'aliment chez des animaux nourris *ad libitum*. Cette hypothèse est examinée plus loin à travers l'analyse de nos données et celles de la littérature concernant le tractus digestif du poulet.

Nous avons pu observer dans deux de nos études sur les lignées D⁺ et D⁻ (Rougière *et al* 2009, Rougière et Carré 2010) que l'effet des lignées sur le poids de l'intestin grêle était moins prononcé lorsque ce poids était rapporté à la consommation plutôt qu'au poids vif

(figure 4), ce qui suggère que l'intestin a tendance à ajuster son poids sur un besoin défini par la consommation alimentaire. Les différences de poids d'intestin entre D⁺ et D⁻ seraient donc dues en partie à la différence de consommation observée entre ces lignées, plus importante chez les D⁻ que chez les D⁺. Pour le gésier, le fait de rapporter le poids à la consommation augmente au contraire la différence entre lignées, ce qui renforce l'idée que la taille du gésier est une composante de la différence entre D⁺ et D⁻.

Figure 4. Régressions sans constante exprimant le poids des organes (gésier ou intestin grêle vides) en fonction du poids vif ou de la consommation journalière, calculées sur une population de poulets en croissance issus des lignées D⁺ et D⁻ nourris avec des régimes à base de maïs.



Un point représente un animal. Pour toutes les régressions, on observe un effet significatif ($P = 0,0001$) des lignées sur les valeurs résiduelles. ETR : écart type résiduel. Les données proviennent de deux expériences (Rougière *et al* 2009, Rougière et Carré 2010).

Cependant, l'observation la plus notable qui souligne la dépendance des organes digestifs à la consommation alimentaire est le constat d'une relation plutôt linéaire entre poids d'organe et consommation, qui contraste avec les relations au poids vif qui sont plutôt de type curvilinéaire (figure 4).

La plupart des études s'intéressant au poids des organes digestifs chez le poulet rapportent rarement des données de consommation alimentaire. Nous n'avons trouvé que cinq études comportant aussi des chiffres de consommation. Cependant, les auteurs n'avaient pas tenté de relier poids d'organe et consommation alimentaire. Nous avons donc dû compléter les calculs de ces études pour pouvoir mettre en relation ces deux variables. Dans ces 5 études, les régressions reliant le poids (g) de l'intestin grêle à la consommation (g) étaient toutes de type linéaire avec les Coefficients de Régression (CR) suivants : 0,165 (Pinchasov *et al* 1985), 0,385 (Boa-Amponsem *et al* 1991), 0,224 (Nir *et al* 1993), 0,345 (Picard *et al* 1999), et 0,300 (lignée D⁺) ou 0,360 (lignée D⁻) (Rougière et Carré 2010). Pour le poids du gésier (g), les régressions étaient aussi linéaires avec les valeurs CR suivantes : 0,20 (*ad libitum*) ou 0,28 (restriction) (Pinchasov *et al* 1985), 0,26 (Boa-Amponsem *et al* 1991), 0,19 (poulet « label ») ou 0,09 (poulet à croissance rapide) (Picard *et al* 1999), 0,28 (lignée D⁺) ou 0,19 (lignée D⁻) (Rougière et Carré 2010). Pour le poids du pancréas (g), des relations linéaires avec la consommation ont également été observées avec les données de Picard *et al* (1999) (CR = 0,026 (« label ») ou 0,021 (croissance rapide)) et celles de Rougière et Carré (2010) (CR = 0,016; résiduelles plus élevées (P = 0,033) chez les D⁺ que chez les D⁻). Dans la plupart de ces régressions, les ordonnées à l'origine étaient faibles et non significativement différentes de zéro.

Concernant le tractus digestif, ces calculs confirment l'hypothèse de relations proportionnelles entre poids d'organe et consommation alimentaire. Il paraît logique que les autres organes viscéraux de la fonction de nutrition varient aussi de la même manière. Ainsi, l'estimation de la consommation alimentaire n'est pas seulement utile pour évaluer le coût alimentaire de la production de poulet de chair, elle est aussi importante parce qu'elle représente probablement un facteur physiologique essentiel associé avec la taille des organes viscéraux de la fonction de nutrition.

3.3 / Conséquences de la croissance rapide sur le poids requis théorique des organes

Si l'on admet que les poids des organes viscéraux de la fonction de nutrition

sont proportionnels à la consommation alimentaire, les poids d'organe rapportés au poids vif devraient augmenter avec les consommations rapportées au poids vif. Or, la sélection pour une croissance de plus en plus rapide fait augmenter la consommation rapportée au poids vif (figure 2). Donc, cette sélection devrait faire augmenter la taille relative des organes de la fonction de nutrition, ce qui n'est pas toujours ce que l'on observe dans la pratique, la sélection du poulet de chair ayant souvent conduit à l'inverse avec une diminution de la taille relative de certains organes (Schmidt *et al* 2009). Pour ces organes, cela signifie que cette sélection a probablement entraîné un risque d'insuffisance fonctionnelle. Cependant, ces risques ont probablement été parfois compensés par une amélioration des efficacités, comme décrit pour l'intestin grêle.

Il est important de noter que le rapport consommation/poids vif évolue lentement avec la sélection génétique pour une croissance rapide (figure 2). Par exemple, lorsque l'on passe de la courbe de croissance « 34 » (abattage à 34 jours pour un poids de 2,5 kg) à la courbe « 20 » (abattage à 20 jours pour un poids de 2,5 kg), notre modèle indique une augmentation du rapport consommation/poids vif de 13 (scénario 1) ou 22% (scénario 2), alors que le rapport gain de poids/poids vif augmente beaucoup plus (69%) (figure 2). Donc, si l'on suppose que la taille relative des organes devrait évoluer de la même manière que le rapport consommation/poids vif, les poids requis des organes devraient évoluer assez lentement avec la sélection pour une croissance rapide. Ceci signifie qu'une insuffisance dans le poids d'un organe par rapport à un poids requis peut être longue et difficile à percevoir. Une telle insuffisance induite par la sélection génétique requière probablement plusieurs générations de sélection avant de pouvoir être clairement identifiée.

Conclusion

Pour un poids à l'abattage de 2,5 kg, nous calculons que, dans le futur, la réduction de la durée d'élevage se traduira par un indice de consommation réduit de 0,031 à 0,036 par jour de réduction. Ces chiffres confirment que la sélection génétique pour une croissance de plus en plus rapide est de loin le moyen le plus efficace pour améliorer l'efficacité alimentaire du poulet de chair.

Cependant, la vitesse de croissance n'a pas été le seul critère de sélection des poulets de chair. L'amélioration du rendement en viande a également été sélectionnée, ce qui s'est traduit par une réduction

du poids relatif de certains organes associés à la fonction de nutrition. De telles réductions peuvent représenter un problème physiologique dans la mesure où, au contraire, une augmentation de la vitesse de croissance devrait normalement se traduire par une augmentation du poids relatif de ces organes.

L'amélioration du rendement en viande, et pas nécessairement l'accélération de la vitesse de croissance, est donc peut-être le principal facteur responsable des désordres physiologiques qui sont parfois observés chez le poulet de chair. Ainsi, la sélection pour la vitesse de croissance, génératrice de progrès pour l'efficacité alimentaire, pourrait s'en trouver ralentie dans le futur si une forte pression de sélection sur le rendement en viande continuait d'être mise en œuvre dans le processus de sélection du poulet de chair. Une légère réduction dans le rendement en viande s'avérera peut-être nécessaire pour obtenir un progrès continu sur le critère de la vitesse de croissance.

L'amélioration de l'efficacité alimentaire par l'accélération de la vitesse de croissance se traduira par une réduction de la consommation des matières premières dédiées à la fourniture d'énergie comme les céréales, le manioc ou les matières grasses. Pour ce qui est des ressources protéiques, les bénéfices attendus de l'accélération de la vitesse de croissance sont moins évidents : dans le cas d'une formulation des acides aminés relative aux protéines brutes relativement constante, les concentrations protéiques alimentaires seront amenées à être augmentées d'une manière considérable et la consommation protéique globale restera peu changée ; dans le cas d'une formulation en acides aminés de plus en plus concentrée relativement aux protéines, les concentrations protéiques alimentaires augmenteront modérément et la consommation protéique globale diminuera. Mais dans ce dernier cas, la dépendance de la formulation alimentaire à la fourniture d'acides aminés purs deviendra de plus en plus importante.

Remerciements

Les auteurs remercient la société Inzo° pour son aide financière apportée dans les études de comparaison génétique. Nos remerciements vont également au Dr Paul Rault (SYSAF, Nouzilly, France) pour ses discussions riches en informations intéressantes et très utiles.

Références

- Biely J., March B.E., 1967. Calcium and vitamin D in broiler rations. *Poult. Sci.*, 46, 223-232.
- Boa-Amponsem K., Dunnington E.A., Siegel P.B., 1991. Genotype, feeding regimen, and diet interactions in meat chickens. 1. Growth, organ size, and feed utilization. *Poult. Sci.*, 70, 680-688.
- Carré B., Méda B., 2015. Cross relationships between growth performance, growth composition and feed composition in broiler chickens, calculated from published data. *Poult. Sci.*, 94, 2191-2201.
- Carré B., Muley N., Gomez J., Oury F.-X., Laffitte E., Guillou D., Signoret C., 2005a. Soft wheat instead of hard wheat in pelleted diets results in high starch digestibility in broiler chickens. *Br. Poult. Sci.*, 46, 66-74.
- Carré B., Mignon-Grasteau S., Svihus B., Péron A., Bastianelli D., Gomez J., Besnard J., Sellier N., 2005b. Nutritional effects of feed form, and wheat compared to maize, in the D+ and D- chicken lines selected for divergent digestion capacity. In: 15th Eur. Symp. Poult. Nutr. World's Poul. Sci. Assoc., Hungarian Branch, Budapest, Hungary, 42-44.
- Carré B., Mignon-Grasteau S., Juin H., 2008. Breeding for feed efficiency and adaptation to feed in poultry. *World's Poul. Sci. J.*, 64, 377-390.
- Carré B., Rougière N., Bastianelli D., Lafeuille O., Mignon-Grasteau S., 2010. Relationships between individual digestion efficiencies and gut anatomy in broilers from experimental D+ and D- digestion lines or from commercial strains. In: Abstract of the 13th Eur. Poul. Conf. World's Poul. Sci. Assoc., French Branch, Nouzilly, France, 192.
- Carré B., Lessire M., Juin H., 2013. Prediction of metabolisable energy value of broiler diets and water excretion from dietary chemical analyses. *Animal*, 7, 1246-1258.
- Carré B., Méda B., Juin H., 2014. Progress in broiler selection: benefits, limitations as assessed by the digestive function, and consequence on dietary lysine concentration. In: 14th Eur. Poul. Conf. World's Poul. Sci. Assoc., Norwegian Branch, 189-209.
- Corr S.A., Gentle M.J., McCorquodale C.C., Bennett D., 2003a. The effect of morphology on the musculoskeletal system of the modern broiler. *Anim. Welf.*, 12, 145-157.
- Corr S.A., Gentle M.J., McCorquodale C.C., Bennett D., 2003b. The effect of morphology on walking ability in the modern broiler: A gait analysis study. *Anim. Welf.*, 12, 159-171.
- De Verdal H., Mignon-Grasteau S., Jeulin C., Le Bihan-Duval E., Leconte M., Mallet S., Martin C., Narcy A., 2010. Digestive tract measurements and histological adaptation in broiler lines divergently selected for digestive efficiency. *Poult. Sci.*, 89, 1955-1961.
- De Verdal H., Narcy A., Bastianelli D., Chapuis H., Mème N., Urvoix S., Le Bihan-Duval E., Mignon-Grasteau S., 2011a. Improving the efficiency of feed utilization in poultry by selection. 1. Genetic parameters of anatomy of the gastro-intestinal tract and digestive efficiency. *BMC Genet.*, 12, 59.
- De Verdal H., Narcy A., Bastianelli D., Chapuis H., Mème N., Urvoix S., Le Bihan-Duval E., Mignon-Grasteau S., 2011b. Improving the efficiency of feed utilization in poultry by selection. 2. Genetic parameters of excretion traits and correlations with anatomy of the gastro-intestinal tract and digestive efficiency. *BMC Genet.*, 12, 71.
- De Verdal H., Narcy A., Bastianelli D., Mème N., Urvoix S., Collin A., le Bihan-Duval E., Mignon-Grasteau S., 2013. Genetic variability of metabolic characteristics in chickens selected for their ability to digest wheat. *J. Anim. Sci.*, 91, 2605-2615.
- Ellison T., 1965. Effect of dextroamphetamine on growth and feed efficiency in broilers. *Poult. Sci.*, 44, 896-898.
- Faure J.M., Ricard F.H., 1980. Note sur les relations entre le rythme cardiaque et le type de croissance chez la poule domestique. *Reprod. Nutr. Dev.*, 20 (4A), 923-928.
- García V., Gomez J., Mignon-Grasteau S., Sellier N., Carré B., 2007. Effects of xylanase and antibiotic supplementations on the nutritional utilisation of a wheat diet in growing chicks from genetic D+ and D- lines selected for divergent digestion efficiency. *Animal*, 1, 1435-1442.
- Gous R.M., Moran E.T., Stilborn H.R., Bradford G.D., Emmans, G., 1999. Evaluation of the parameters needed to describe the overall growth, the chemical growth, and the growth of feathers and breast muscles of broilers. *Poult. Sci.* 78, 812-821.
- Hadad Y., Halevy O., Cahaner A., 2014. Featherless and feathered broilers under control versus hot conditions. 1. Broiler meat yield and quality. *Poult. Sci.*, 93, 1067-1075.
- Jones G.P.D., 1995. Manipulation of organ growth by early-life food restriction: its influence on the development of ascites in broiler chickens. *Br. Poult. Sci.*, 36, 135-142.
- Julian R.J., 1993. Ascites in poultry. *Avian Pathol.*, 22, 419-454.
- Kadhim K.K., Zuki A.B.Z., Noordin M.M., Babjee S.A., Khamas W., 2010. Growth evaluation of selected digestive organs from day one to four months post-hatch in two breeds of chicken known to differ greatly in growth rate. *J. Anim. Vet. Adv.*, 9, 995-1004.
- Kras R.V., Kessler A.M., Ribeiro A.M.L., Henn J.Di, dos Santos Il, Halfen D.P., Bockor L., 2013a. Effect of dietary fiber and genetic strain on the performance and energy balance of broiler chickens. *Braz. J. Poult. Sci.*, 15, 15-20.
- Kras R.V., Kessler A.M., Ribeiro A.M.L., Henn J.Di, Bockor L., Sbrissia A.F., 2013b. Effect of dietary fiber, genetic strain and age on the digestive metabolism of broiler chickens. *Braz. J. Poult. Sci.*, 15, 83-89.
- Leclercq B., 1983. The influence of dietary protein content on the performance of genetically lean or fat growing chickens. *Br. Poult. Sci.*, 24, 581-587.
- Leenstra F., Cahaner, A., 1991. Genotype by environment interactions using fast growing, lean or fat broiler chickens, originating from the Netherlands and Israel, raised at normal or low temperature. *Poult. Sci.*, 70, 2028-2039.
- Lemme A., Wjitten P.J., Van Wichen J., Petri A., Langhout D.J., 2006. Responses of male growing broilers to increasing levels of balanced protein offered as coarse mash or pellets of varying quality. *Poult. Sci.*, 85, 721-730.
- Mignon-Grasteau S., Muley N., Bastianelli D., Gomez J., Péron A., Sellier N., Millet N., Besnard J., Hallouis J.M., Carré, B., 2004. Heritability of digestibilities and divergent selection for digestion ability in growing chicks fed a wheat diet. *Poult. Sci.* 83, 860-867.
- Nir I., Nitsan Z., Mahagna M., 1993. Comparative growth and development of the digestive organs and of some enzymes in broiler and egg type chicks after hatching. *Br. Poult. Sci.* 34, 523-532.
- Péron A., Bastianelli D., Oury F.-X., Gomez J., Carré, B., 2005. Effects of food deprivation and particle size of ground wheat on digestibility of food components in broilers fed a pelleted diet. *Br. Poult. Sci.*, 46, 223-230.
- Péron A., Gomez J., Mignon-Grasteau S., Sellier N., Besnard J., Derouet M., Juin H., Carré B., 2006. Effects of wheat quality on digestion differ between the D+ and D- chicken lines selected for divergent digestion capacity. *Poult. Sci.*, 85, 462-469.
- Picard M., Siegel P.B., Leterrier C., Geraert P.A., 1999. Diluted starter diet, growth performance, and digestive tract development in fast- and slow-growing broilers. *J. Appl. Poult. Res.*, 8, 122-131.
- Pinchasov Y., Nir I., Nitsan Z., 1985. Metabolic and anatomical adaptations of heavy bodied chicks to intermittent feeding. I. Food intake, growth rate, organ weight, and body composition. *Poult. Sci.*, 64, 2098-2109.
- Rosenberg D.W., Woodward W.D., Kline A.E., 1967. Effect of buquinolate on broiler chicks in floor pen trials. *Poult. Sci.*, 46, 1113-1116.
- Rougière N., Carré B., 2010. Comparison of gastrointestinal transit times between chickens from D+ and D- genetic lines selected for divergent digestion efficiency. *Animal*, 4, 1861-1872.
- Rougière N., Gomez J., Mignon-Grasteau S., Carré B., 2009. Effects of diet particle size on digestive parameters in D+ and D- genetic chicken lines selected for divergent digestion efficiency. *Poult. Sci.*, 88, 1206-1215.
- Rougière N., Malbert C.-H., Rideau N., Cognié J., Carré B., 2012. Comparison of gizzard activity between chickens from genetic D+ and D- lines selected for divergent digestion efficiency. *Poult. Sci.*, 91, 460-467.
- Schmidt C.J., Persia M.E., Feierstein E., Kingham B., Saylor W.W., 2009. Comparison of a modern broiler line and a heritage line unselected since the 1950s. *Poult. Sci.*, 88, 2610-2619.
- Whitehead C.C., Griffin H.D., 1984. Development of divergent lines of lean and fat

broilers using plasma very low density lipoprotein concentration as selection criterion: the 1st 3 generations. Br. Poult. Sci., 25, 573-582.

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. Poult. Sci., 93, 2970-2982.

Résumé

Les conséquences de la sélection du poulet de chair pour une croissance rapide sont examinées à l'aide d'un modèle basé sur 6 équations développées dans une publication précédente (Carré et Méda 2015). Pour un poids à l'abattage de 2,5 kg, on calcule que l'indice de consommation est réduit linéairement par la diminution de l'âge d'abattage d'une valeur allant de 0,031 à 0,036 par jour de réduction dans la durée d'élevage. D'après ce calcul, la sélection pour une croissance rapide paraît être de loin le moyen le plus efficace pour améliorer l'efficacité alimentaire du poulet de chair. On calcule avec ce modèle que les économies d'aliment associées à de futures accélérations dans la vitesse de croissance concerneront à la fois les ressources énergétiques et protéiques. Cependant, ces économies de protéines proviendront essentiellement d'une augmentation de l'utilisation des acides aminés purs et non de l'accélération de la vitesse de croissance. Chez le poulet de chair moderne, la réduction de la taille relative des organes résultant de l'accroissement du rendement en viande s'est trouvée à l'opposé de ce que l'on pouvait attendre d'un accroissement de la consommation alimentaire relative au poids vif. Ce paradoxe a été rendu possible par une amélioration de l'efficacité des organes, ou par une disparition de fonction, comme illustré par des publications antérieures décrivant des études sur la taille et l'efficacité du tractus digestif chez des poulets de chairs d'origine commerciale ou provenant des lignées génétiques expérimentales D⁺ et D⁻ sélectionnées d'une manière divergente sur l'efficacité digestive.

Abstract

Benefits and limitations of the genetic selection of broilers for rapid growth

Consequences of broiler selection for rapid growth are examined using a calculation model based on a 6 equations system developed in a previous paper (Carré and Méda 2015). With a 2.5 kg slaughter body weight objective, this model predicts that one day reduction in the rearing period linearly reduces the feed conversion ratio by a value ranging from 0.031 to 0.036. Thus, according to this calculation, genetic selection for increased growth rate is by far the most efficient way to improve feed efficiency. Also, feed saving associated with future increased growth rate will affect both energy and protein feed sources. However, the anticipated protein saving effect will come mainly from increased utilization of pure amino acids, not from improved growth rate. In modern broiler lines, the reduction in relative organ sizes resulting from the increased meat yield was at the opposite of what it should be expected when considering an increased feed intake relative to body weight. This paradox can be explained in modern broilers either by an improved efficiency of organs or by a disappearance of some functions, as assessed by previous studies on the size and efficiency of the digestive tract performed in commercial broilers and in the experimental genetic broiler lines D⁺ and D⁻ divergently selected for digestion efficiency.

CARRÉ B., MÉDA B., JUIN H., 2015. Bénéfices et contraintes de la sélection génétique du poulet de chair pour une croissance rapide. INRA Prod. Anim., 28, 305-314.

