



HAL
open science

Variabilité génétique de l'efficacité alimentaire en régime alimentaire suboptimal chez le poulet de chair : perspectives pour la sélection

Sandrine Mignon-Grasteau, Agnès Narcy, Thanh-Son T.-S. Tran, Hugues H. de Verdal, Denis Bastianelli, Herve H. Juin, Bernard B. Carré

► To cite this version:

Sandrine Mignon-Grasteau, Agnès Narcy, Thanh-Son T.-S. Tran, Hugues H. de Verdal, Denis Bastianelli, et al.. Variabilité génétique de l'efficacité alimentaire en régime alimentaire suboptimal chez le poulet de chair : perspectives pour la sélection. 10èmes Journées de la Recherche Avicoles et Palmipèdes à Foie Gras, Mar 2013, La Rochelle, France. hal-02749610

HAL Id: hal-02749610

<https://hal.inrae.fr/hal-02749610v1>

Submitted on 3 Jun 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.

VARIABILITE GENETIQUE DE L'EFFICACITE ALIMENTAIRE EN REGIME ALIMENTAIRE SUBOPTIMAL CHEZ LE POULET DE CHAIR : PERSPECTIVES POUR LA SELECTION

Mignon-Grasteau Sandrine^{1,x}, Nancy Agnès¹, Tran Son-Thanh¹, de Verdal Hugues², Bastianelli Denis³, Juin Hervé⁴, Carré Bernard¹

¹ INRA, UR83 Recherches Avicoles, F-37380 NOUZILLY

² CIRAD, UMR INTREPID, Campus de Baillarguet, TA C-18/A, F- 34398 MONTPELLIER cedex 05

³ CIRAD, UMR SELMET, Laboratoire d'alimentation Animale, Campus de Baillarguet, TA C-112/A, F- 34398 MONTPELLIER cedex 05

⁴ INRA, UE EASM, Domaine du Magneraud, BP52, F-17700 SURGERES
sgrasteau@tours.inra.fr

RESUME

Le coût de l'aliment représente une part prépondérante des coûts de production du poulet de chair. L'efficacité alimentaire est donc un élément clé de la rentabilité de la production avicole. La sélection génétique des poulets de chair a résulté en une amélioration considérable de l'indice de consommation, en utilisant des régimes alimentaires de bonne qualité. De nos jours, alors que le prix des matières premières de bonne qualité et que la population humaine augmentent, l'intérêt d'une sélection d'animaux efficaces sur des régimes suboptimaux est renforcé, à la fois pour des raisons économiques et éthiques. Ces régimes pourraient inclure des matières premières moins chères ou des co-produits de l'agriculture qui ne sont pas consommés par l'homme. Cependant, ces matières premières alternatives sont souvent de qualité moindre et variable. Ce type d'approche représente un challenge pour la sélection, qui repose d'ordinaire sur l'utilisation de régimes optimisés afin d'exprimer le potentiel génétique de croissance des animaux en minimisant les effets de l'environnement. Cette revue vise à évaluer l'intérêt potentiel de l'utilisation de régimes de moindre qualité pour la sélection de l'efficacité alimentaire. Elle montre l'importance, en conditions difficiles, du choix du critère de sélection (efficacité digestive ou alimentaire plutôt que croissance). Est également soulignée l'importance de la définition précise des conditions alimentaires dans les études de génétique car ces conditions influencent la réponse à la sélection. Enfin, il est nécessaire de ne pas limiter l'étude des réponses à la sélection à l'évolution de la moyenne du troupeau, mais également de son homogénéité.

ABSTRACT

Genetic variability of feed efficiency with suboptimal diets in broilers: perspectives for selection

Feed cost represents the highest part of production cost in broiler. Feed efficiency is thus a key factor of profitability in poultry production. Selection of broilers has resulted in a sharp decrease of feed conversion ratio, using good quality diets. Nowadays, as the cost of high quality feedstuffs used in poultry diets is continuously increasing and as human population increases, the interest of selection for more efficient birds even when using low quality feedstuffs is reinforced both for economic and ethical reasons. These diets could include less costly feedstuffs or by-products of agriculture that would not be in competition with human food. However, these feedstuffs are often of lower and more variable quality. This type of diet represents a challenge for genetic selection, which usually relies on optimal diets in order to allow birds to express their genetic potential for growth and to minimize the effects of environment. This review aims at evaluating the potential interest of selection under non-optimal diet to improve feed efficiency. It shows the importance, in difficult conditions, of the choice of the selection criterion (digestive or feed efficiency instead of growth). It also underlines the importance of description of feed conditions in genetic studies as it affects response to selection. Finally, it is necessary to extend the study of response to selection to homogeneity of the group and not only to the evolution of the mean.

INTRODUCTION

L'aliment représente de 55 à 65% du coût de production selon le type de production (Riffard *et al.*, 2011). L'efficacité alimentaire est donc un élément clé de la rentabilité de la filière avicole. La sélection d'animaux à croissance rapide et à indice faible a conduit à une diminution continue de l'indice de consommation des poulets standards. Les poulets certifiés, moins fortement sélectionnés sur ces caractères montrent une tendance similaire, quoique moins marquée. En revanche, chez le poulet label non sélectionné sur ces caractères, cette tendance n'est pas présente (Riffard *et al.*, 2011).

L'importance de l'efficacité alimentaire est aujourd'hui renforcée pour des raisons économiques, mais également éthiques. Le coût de l'aliment, spécialement pour les régimes de haute qualité dont ont besoin les animaux à haut potentiel génétique, augmente continuellement. Entre 2006 et 2010, ce coût a ainsi augmenté de 30,9% (Riffard *et al.*, 2011). Ces prix peuvent devenir des facteurs limitants, notamment pour les pays en voie de développement qui doivent importer ces matières premières et ne peuvent parvenir à les rentabiliser par des performances maximales en raison de contraintes environnementales. Dans le même temps, l'accroissement de la population humaine conduit à une augmentation de la demande de viande de volailles, et donc des matières premières utilisées dans les régimes. D'un point de vue éthique, il est important de réduire la pression de l'élevage sur les surfaces cultivées, actuellement dédiées à 80% à l'alimentation animale contre seulement 20% pour l'alimentation humaine (Steinfeld *et al.*, 2006). Pour atteindre cet objectif, il faudrait remplacer partiellement ces matières premières de haute qualité, notamment par celles qui ne sont pas utilisées pour l'alimentation humaine. Cependant, celles-ci sont fréquemment de qualité médiocre et variable, ce qui limite leur utilisation pour les génotypes modernes. Il serait donc opportun de sélectionner des animaux capables de valoriser efficacement ces régimes suboptimaux.

COMPOSANTES DES CARACTERES D'EFFICACITE ALIMENTAIRE

L'indice de consommation (IC) est un caractère composite qui dépend de la composition de l'aliment et de la vitesse de croissance. Il peut être modélisé ainsi (Carré *et al.*, 2008a; Carré et Mignon-Grasteau, 2009; Noblet *et al.*, 2010):

$$IC = \frac{119D \frac{MBW}{PW} + 9,36 C_L + 5,66 C_P}{0,8 EMAn} \quad [1]$$

où D est la durée (J) de production, MBW le poids métabolique ($BW^{0,6}$, kg) moyen, PW (g) le gain de poids, C_L et C_P les concentrations (g/g) en lipides et protéines du gain de poids et EMAn (kcal/g) l'énergie métabolisable corrigée pour un bilan azoté nul.

Cette équation illustre pourquoi la croissance rapide et la composition corporelle ont été utilisées comme critères indirects d'amélioration de l'IC. La sélection directe a également été mise en œuvre, mais elle est plus complexe, car la mesure de l'IC implique l'enregistrement de la consommation alimentaire individuelle, et donc l'élevage en cage. Fairfull et Chambers (1984) ont estimé que 65% des différences d'IC sont dues à des différences de poids, de croissance et de composition corporelle, les 35% restant étant dues à des différences comportementales, notamment d'activité physique.

SELECTION SUR L'INDICE DE CONSOMMATION

Sélection directe de l'indice de consommation

La sélection directe de l'IC est possible du fait de son héritabilité modérée, de l'ordre de 0,20 (Pym, 1990). Cela a été confirmé par des expériences de sélection sur ce caractère, qui ont en outre montré que la sélection directe était plus efficace qu'une sélection indirecte sur la vitesse de croissance ou l'engraissement (Leenstra et Pit, 1987; Sutedjo *et al.*, 2001). Cependant, toutes ces expériences ont été réalisées en utilisant des régimes alimentaires de bonne qualité, permettant aux animaux d'exprimer leur potentiel génétique maximum de croissance.

Sélection indirecte sur la vitesse de croissance en environnement suboptimal

Godfrey (1968), Neisheim (1975), Sorensen (1980) et Marks (1978) ont sélectionné des poulets de chair et des cailles sur la vitesse de croissance en utilisant soit des régimes classiques (NP) soit des régimes pauvres en protéines ou en lysine (LP, -30% par rapport au régime classique). Enfin, Leenstra et Pit (1987) ont sélectionné des poulets sur la vitesse de croissance en les nourrissant *ad libitum* ou avec une restriction alimentaire.

Toutes ces études ont montré que la réponse à la sélection sur la vitesse de croissance était plus faible en environnement suboptimal qu'en environnement optimal, ce qui est cohérent avec les héritabilités, en général plus faibles de 0,05 à 0,10 en environnement défavorable (Godfrey, 1968; Marks, 1978, 1987). Ainsi, Leenstra et Pit (1987) ont dû appliquer une pression de sélection 2 fois plus importante pour les LP que pour les NP pour obtenir une réponse équivalente. En appliquant une pression similaire pendant 7 générations, la réponse à la sélection sur la vitesse de croissance a été 3 fois plus importante chez les animaux NP par rapport aux LP (Sorensen, 1980). Lorsque les 2 souches sont nourries avec un régime normal, les NP sont 75 g plus lourds que les LP (Sorensen, 1985). En revanche, lorsqu'ils sont nourris avec le régime à taux protéique réduit utilisé pour la sélection, les LP sont 180 g plus lourds que les NP. Cette stratégie de sélection ne permet donc pas d'aboutir à une souche qui soit plus performante que l'autre quelles que soient les conditions. De plus, lorsque le taux protéique est trop réduit, les performances des LP deviennent extrêmement variables.

Enfin, cette sélection a eu un effet défavorable sur la composition corporelle et sur l'efficacité alimentaire.

En effet, comme seul le taux protéique a été modifié dans le régime (et pas la concentration en énergie), les oiseaux augmentent leur consommation alimentaire pour atteindre leurs besoins protéiques. Ainsi, la lignée de cailles sélectionnée sur la croissance avec un régime à taux réduit de lysine consomme 11 à 13% de plus que celle sélectionnée en régime normal lorsque le régime à un taux réduit de lysine, mais les différences disparaissent avec un régime normal (Godfrey, 1968). Cet excès de consommation est déposé sous forme de gras, ce que l'on peut déduire de l'équation [1]. Ainsi, les LP ont un engraissement total et abdominal plus élevé que les NP de respectivement 17 et 37% lorsqu'ils sont nourris avec un régime commercial, mais ces écarts montent à 25 et 60% lorsqu'ils sont nourris avec un régime carencé (Sorensen, 1980). Les LP ont un IC plus élevé de 0.05 points, une digestibilité de la matière sèche et une rétention azotée plus faibles que les NC (-1.3 et -6.4% respectivement, Sorensen *et al.*, 1983).

Sélection indirecte sur l'efficacité digestive

On a longtemps pensé que l'efficacité digestive n'était pas héritable et que les différences entre souches étaient faibles chez des animaux déjà très efficaces (Neisheim, 1975; Pym, 1990). Cependant, Carré *et al.* (2002) ont montré que la variabilité entre animaux nourris avec des régimes à base de blé était plus forte que la variabilité entre variétés de blé (environ 900 et 300 kcal.kg⁻¹ MS, respectivement). Plus récemment, Bandengan *et al.* (2009) ont également constaté que la variabilité de digestibilité iléale des protéines et des acides aminés variait plus fortement entre animaux qu'entre régimes, même en utilisant des matières premières aussi variables que les drèches. Ainsi dans leur étude, la variabilité de la digestibilité des acides aminés est due pour 4.9 à 24.1% au régime, et pour 75.9 à 95.1% aux animaux intra-régime.

Mignon-Grasteau *et al.* (2004) ont montré que l'efficacité digestive était héritable lorsque les animaux étaient nourris avec un régime contenant 50% de blé Rialto, difficile à digérer en raison de sa dureté et de sa viscosité élevées (Carré *et al.*, 2002). Après 8 générations de sélection divergente, l'efficacité digestive (EMAn) diffère de 35 à 40% entre les lignées haute (D+) et basse (D-, Mignon-Grasteau *et al.*, 2010; de Verdal *et al.*, 2010, 2011a). Après 7 générations de sélection, les digestibilités de l'amidon, des protéines et des lipides sont plus élevées chez les D+ que chez les D- (42%, 15% et 50%, resp., Carré *et al.*, 2008b). Sur régime blé, les D+ présentent une EMAn de 6.2 à 8.7% plus élevée et un taux d'excrétion d'azote de 17.6% plus faible par rapport à un génotype commercial (Carré *et al.*, 2008a; de Verdal *et al.*, 2012). Sur régime maïs, les différences entre D+ et D- persistent mais sont très réduites, de 2.5 à 5.0% pour l'EMAn (Carré *et al.*, 2008a; Mignon-Grasteau *et al.*, 2010). Ces différences sont associées à un intestin grêle plus petit et à un gésier plus gros chez les D+ (Garcia *et al.*, 2007; Rougière *et al.*, 2009; de Verdal *et al.*, 2010, 2011a), ces derniers présentant également un temps de rétention dans le gésier beaucoup plus élevé (Rougière et Carré, 2010). La physiologie du gésier semble donc être impliquée dans les différences entre D+ et D-, celui-ci

étant plus sensible aux variations de l'alimentation chez les D- (Rougière *et al.*, 2012).

Les différentes études menées sur ces souches montrent que les performances des D+ dépendent moins des caractéristiques de l'aliment que celles des D- (Carré *et al.*, 2008a; Rougière *et al.*, 2009) et que, par opposition aux expériences de sélection sur la vitesse de croissance en régime alimentaire suboptimal, la sélection sur l'EMAn a conduit à des animaux plus adaptables sans affecter l'engraissement (de Verdal *et al.*, 2012).

Enfin, les fortes corrélations génétiques entre caractères d'efficacité digestive mesurés sur blé ou sur maïs montrent que sélectionner dans un milieu améliorerait les performances dans les 2 milieux, mais que la sélection serait plus efficace sur régime blé, où l'héritabilité est plus élevée que sur régime maïs (Mignon-Grasteau *et al.*, 2010).

DONNEES GENOMIQUES DE L'EFFICACITE ALIMENTAIRE

Détection de QTL

Malgré l'importance de l'efficacité alimentaire pour la production de volailles, très peu de QTL ont été rapportés pour ces caractères. Chez le porc par exemple, Rothschild *et al.* (2007) ont constaté que sur 1675 QTL détectés, seuls 8 l'étaient pour l'IC, contre 16, 224, et 404 pour la consommation alimentaire, la vitesse de croissance et l'engraissement. De même chez les volailles, seuls 25 des 2736 QTL détectés se réfèrent à l'efficacité alimentaire (de Koning *et al.*, 2003, 2004; Parsanejad *et al.*, 2004; Hansen *et al.*, 2005; Ewald *et al.*, 2007). Même si ce déséquilibre est en partie dû au faible nombre de dispositifs permettant cette détection et à la difficulté d'acquisition de la mesure, on peut noter que la plupart des études recherchant des QTL d'IC ont trouvé des QTL se référant aux composants de cet IC plutôt que des QTL d'IC en tant que tel (Hocking, 2005, Abasht *et al.*, 2006). Aucune de ces études n'a été réalisée sur régime difficile. A l'opposé, l'étude de Tran *et al.* (2013) a montré l'existence de QTL d'efficacité digestive sur un régime difficile, mais de même que pour l'IC, ce sont principalement des QTL des composantes de l'efficacité digestive qui ont été détectés.

Gènes candidats et données d'expression

Des études chez le poulet de chair ont également trouvé une association entre IC et des variations de SNP dans des gènes de régulation du métabolisme et la répartition de l'énergie (récepteur à l'hormone de croissance et neuropeptide Y, Sherman *et al.*, 2008), de la thermogénèse et le transport des protons (UCP aviaire, Sharma *et al.*, 2008, Bottje *et al.*, 2009), l'homéostasie énergétique et le comportement alimentaire (récepteur à la mélanocortine 3, Sharma *et al.*, 2008).

La comparaison de niveaux d'expression de gènes entre animaux à fort ou faible IC a mis en évidence des gènes impliqués dans la régulation du métabolisme énergétique mitochondrial (Ojano-Dirain *et al.*, 2007),

et dans les HSP impliqués dans la réponse au stress oxydatif (Kong *et al.*, 2011).

PERSPECTIVES POUR LA SÉLECTION EN RÉGIME ALIMENTAIRE SUBOPTIMAL

Variabilité des matières premières

La variabilité de qualité des matières premières est un problème pour la sélection de l'efficacité alimentaire sur régimes alternatifs, car elle ne permet pas d'avoir un environnement de sélection reproductible. C'est tout particulièrement le cas en ce qui concerne des matières premières telles que les drèches ou le son dont la qualité dépend fortement de la composition du matériau de base, et des procédés technologiques (séchage, broyage, addition de solvants). Par exemple, Ravindran et Blair (1991) ont montré que selon le procédé utilisé, les proportions de fibres et de lipides dans le son de riz variaient respectivement de 12.6 à 30.9% et de 6.6 à 31.6%. Selon l'échantillon d'une même drèche, la digestibilité apparente des acides aminés essentiels tels que la lysine ou la thréonine varie de 24.4 à 45.7% et de 48.2 à 60.9%, respectivement (Bandegan *et al.*, 2009).

Environnement de sélection

Il est admis que l'efficacité de la sélection décroît lorsque l'environnement de sélection est défavorable car la variance due à l'environnement augmente et l'héritabilité, et donc les possibilités de sélection, diminue. De fait, si le critère de sélection est la vitesse de croissance, l'animal a besoin de cet environnement optimal pour exprimer son potentiel de croissance, particulièrement pour les génotypes modernes, dont la croissance rapide et le taux élevé de dépôt de protéines requiert un régime de haute qualité protéique et énergétique. Cependant, si le critère d'intérêt est la robustesse des animaux face à un environnement difficile, c'est précisément dans cet environnement difficile que la capacité de l'animal à faire face à un environnement difficile pourra s'exprimer. Les fortes corrélations génétiques trouvées entre capacités à digérer le blé et le maïs montrent qu'améliorer les performances de digestion dans un environnement difficile amélioreront également les performances en environnement plus favorable (Mignon-Grasteau *et al.*, 2010).

Critères de sélection

Une attention particulière doit être portée au choix du critère de sélection pour améliorer l'efficacité

alimentaire sur régime difficile. Les résultats de Sorensen *et al.* (1980, 1983) montrent que la sélection sur la vitesse de croissance d'animaux restreints en protéines conduirait à une augmentation de la consommation alimentaire et de l'engraissement, alors que la sélection sur l'efficacité digestive sur régime blé ne modifie ni la consommation ni l'engraissement dans la lignée haute (Mignon-Grasteau *et al.*, 2004, 2010). Pour la sélection en environnement non optimal, des critères de sélection tels que l'EMAn ou le coefficient d'utilisation digestive de la matière sèche sont des critères plus appropriés que la vitesse de croissance. L'âge auquel la sélection est pratiquée est également important, en liaison avec la vitesse de développement du tractus digestif, forte dans les premières semaines de vie, ce qui augmente les chances de succès de la sélection à cet âge. Ainsi, les animaux des lignées D+ et D- sont sélectionnés à l'âge de 3 semaines, âge auquel la différence sur le tractus digestif, qui apparaît à 1 semaine est maximale. Cette différence tend à disparaître à 8 semaines d'âge (Rougière et Carré, 2010 ; de Verdal *et al.*, 2012).

Homogénéité des résultats

Lorsque la sélection est pratiquée en environnement difficile, une attention particulière doit également être portée aux conséquences sur l'homogénéité des performances, en plus des conséquences sur la moyenne des performances. Les données collectées sur plusieurs générations de D+ et de D- montrent ainsi que les coefficients de variation de l'EMAn et des coefficients d'utilisation digestive des aliments sont très sensibles au régime chez les D-, mais pas chez les D+ (cf. Table 1, Mignon-Grasteau *et al.*, 2010). Il est toutefois à noter que dans la plupart des études, seuls un écart type global est mentionné ce qui ne permet pas de vérifier si la variance change en fonction de l'environnement.

Conclusions

Cette revue illustre que la sélection pour une amélioration de l'efficacité alimentaire en utilisant des régimes difficiles peut être efficace pour peu que les critères de sélection et plus particulièrement les conditions d'âge soient appropriés. Il est ainsi manifeste qu'il est préférable de sélectionner sur l'efficacité digestive que sur la vitesse de croissance. Enfin, en plus de l'amélioration de la valeur moyenne de la population, le maintien de l'homogénéité de la population est un objectif supplémentaire, celle-ci étant un facteur important de rentabilité de l'élevage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abasht B., Dekkers J.C.M., Lamont S., 2006. *Poult. Sci.*, (85), 2079–2096.
 Bandegan A., Guenter W., Hoehler D., Crow G.H., Nyachoti C.M., 2009. *Poult. Sci.*, (88), 2592-2599.
 Bottje W., Brand M.D., Ojano-Dirain C., Lassiter K., Toyomizu M., Wing T., 2009. *Poult. Sci.*, (88), 1683-1693.
 Carré B., Mignon-Grasteau S. 2009. In: 58th Annual National Breeder Roundtable; Saint Louis (USA); 14-15/05/2009, pp. 20-34. Poultry Breeders of America, US Poultry & Egg Association, Tucker, GA (USA).
 Carré B., Idi A., Maisonnier S., Melcion J. P., Oury F. X., Gomez J., Pluchard P., 2002. *Br. Poult. Sci.*, (43), 404–415.
 Carré B., Mignon-Grasteau S., Juin H., 2008a. *W. Poult. Sci. J.*, (64), 377-390.

- Carré B., Mignon-Grasteau S., Besnard J., Rougière N., Juin H., Bastianelli D., 2008b. Proc. 23th W. Poult. Cong., Brisbane (Australia), 30/06-04/07/2008.
- de Koning D.J., Windsor D., Hocking P.M., Burt D.W., Law A., Haley C.S., Morris A., Vincent J., Griffin H., 2003. J. Anim. Sci., (81), 1158-1165.
- de Koning D.J., Haley C.S., Windsor D., Hocking P.M., Griffin H., Morris A., Vincent J., Burt D., 2004. Genet. Res., (83), 211-220.
- de Verdal H., Mignon-Grasteau S., Jeulin C., le Bihan-Duval E., Leconte M., Mallet S., Martin A., Narcy A., 2010. 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. 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. BMC Genet. (12), 71.
- de Verdal H., Mignon-Grasteau S., Bastianelli D., Mème N., Le Bihan-Duval E., Narcy A., 2012. J. Anim. Sci. (doi:10.2527/jas2012-5572).
- Ewald S.J., Ye X., Avendano S., McLeod S., Lamont S.J., Dekkers J.C.M., 2007. Anim. Genet., (38), 174-176.
- Fairfull R.W., Chambers J.R., 1984. Can. J. Anim. Sci., (64), 513-527.
- García V., Gomez J., Mignon-Grasteau S., Sellier N., Carré B., 2007. Anim., (1), 1435-1442.
- Godfrey E.F., 1968. Poult. Sci., (47), 1559-1565.
- Hansen C., Yi N., Zhang Y.M., Xu S., Gavora J., Cheng H.H., 2005. Anim. Biotechnol., (16), 67-79.
- Hocking P., 2005. W. Poult. Sci. J., (61), 215-226.
- Kong B.W., Song J.J., Lee J.Y., Hargis B.M., Wing T., Lassiter K., Bottje W., 2011. Poult. Sci., (90), 2535-2547.
- Leenstra F., Pit R., 1987. Poult. Sci., (66), 193-202.
- Marks H.L., 1978. Theor. Appl. Genet., (52), 105-111.
- Marks H.L., 1987. Poult. Sci., (66), 1252-1257.
- Mignon-Grasteau S., Muley N., Bastianelli D., Gomez J., Péron A., Sellier N., Millet N., Besnard J., Hallouis J.M., Carré B., 2004. Poult. Sci., (83), 860-867.
- Mignon-Grasteau S., Juin H., Sellier N., Bastianelli D., Gomez J., Carré B., 2010. Proc. 9th W. Cong. Genet. Appl. Livest. Prod., Leipzig, 01-06/08/2010.
- Neisheim M.C., 1975. In: The Effect of Genetic Variance on Nutritional Requirements of Animals, Nat. Acad. Sci., Washington, D.C., 47-87.
- Noblet J., Dubois S., Labussière E., Carré B., van Milgen J. 2010. In : Proc. 3rd EAAP Internat. Symp. on Energy and Protein Metabolism and Nutrition, Parma, 06-10/09/2010, 573-582. Wageningen Acad. Publishers.
- Ojano-Dirain C., Toyomizu M., Wing T., Cooper M., Bottje W.G., 2007. Poult. Sci., (86), 372-381.
- Parsanejad R., Zadworny D., Kuhnlein D., 2002. Poult. Sci., (81), 1668-1670.
- Parsanejad R., Praslickova D., Zadworny D., Kuhnlein U., 2004. Poult. Sci., (83), 1518-1523.
- Pym R.A.E., 1990. In: Poultry breeding and genetics, R. D. Crawford (ed.), Elsevier, Amsterdam, 847-876.
- Ravindran V., Blair R., 1991. W. Poult. Sci. J., (47), 213-231.
- Riffard C., Gallot S., Magdelaine P., 2011. Rapport technique, ITAVI, 57 pp.
- Rothschild M.F., Hu Z.L., Jiang Z., 2007. Int. J. Biol.Sci., (3), 192-196.
- Rougière N., Gomez J., Mignon-Grasteau S., Carré B., 2009. Poult. Sci., (88), 1206-1215.
- Rougière N., Carré B., 2010. Animal, (4), 1861-1872.
- Rougière N., Malbert C.H., Rideau N., Cognié J., Carré B. 2012. Poult. Sci., (91), 460-467.
- Sharma P., Bottje W., Okimoto R., 2008. Poult. Sci., (87), 2073-2086.
- Sherman E.L., Nkrumah J.D., Murdoch B.M., Moore S.S., 2008. Anim. Genet., (39), 225-231
- Sorensen P., 1980. Proceedings of the 6th European Poult. Conference, Hamburg, (2), 64-71.
- Sorensen P., Chwalibog A., Eggum B.O., 1983. Br. Poult. Sci., (24), 237-250.
- Sorensen P., 1985. Proc. 18th Poult. Sci. Symp., Harlow, Roslin, UK, 85-95.
- Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., de Haan C., 2006. FAO, Rome, 390 pp.
- Sutedjo H., Knott L., Pym R.A.E., 2001. Proc. Austr. Poult. Sci. Symp., (13), 175-178.
- Tran S.T., Narcy A., Carré B., Gilbert H., Demeure O., Bed'Hom B., Chantry-Darmon C., Boscher M.Y., Bastianelli D., Sellier N., Chabault M., Calenge F., Le Bihan-Duval E., Beaumont C., Mignon-Grasteau S., 10èmes J. Rech. Avic. Palm. Foie Gras, La Rochelle, 2013.

Table 1. Effet du régime sur la valeur moyenne (μ) et sur la variabilité (coefficient de variation CV) des performances digestives des lignées D+ et D-.

	Régime "Maïs"				Régime "Blé"			
	D+		D-		D+		D-	
	μ	CV (%)	μ	CV (%)	μ	CV (%)	μ	CV (%)
EMAn (kcal.kg ⁻¹ MS)	3298	6.6	3063	7.3	3247	8.6	2411	26.5
Digestibilité des lipides (%)	90.9	3.1	84.6	11.2	83.0	12.0	68.6	26.2
Digestibilité de l'amidon (%)	97.9	0.9	96.8	2.0	96.1	3.6	87.4	14.2
Digestibilité des protéines (%)	83.1	4.8	78.6	6.7	77.4	6.0	68.1	11.7