

Paramètres génétiques de l'efficacité alimentaire et faisabilité d'une sélection en population bovine Charolaise

Sébastien TAUSSAT^{1,2}, Clément FOSSAERT³, Gonzalo CANTALAPIEDRA-HIJAR⁴, Laurent GRIFFON⁵, Pauline MARTIN¹, Gilles RENAND¹

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

²Eliance, 149 rue de Bercy, 75012, Paris, France

³Institut de l'élevage, mon voisin, 35652, Le Rheu, France

⁴Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMR Herbivores, 63122, Saint-Genès-Champanelle, France

⁵Institut de l'élevage, 149 rue de Bercy, 75595, Paris, France

Courriel : sebastien.taussat@eliance.fr

■ Améliorer l'efficacité alimentaire est un levier pour accroître la compétitivité des élevages allaitants. Actuellement évaluée en station, cette information est peu utilisée dans les objectifs de sélection. Nous nous posons ici la question de la faisabilité d'une sélection sur l'efficacité alimentaire à partir de récents essais menés sur des jeunes animaux mâles et femelles nourris sur la base d'aliments différents.

Introduction

L'élevage allaitant tire avantage de la transformation de l'herbe par les femelles reproductrices. Dans les élevages dits naisseurs, le cheptel de vaches reproductrices fait naître les veaux qui sont élevés jusqu'au sevrage. Ces femelles sont conduites au pâturage la plus grande partie de l'année et nourries, en hiver, avec des rations fourragères pour couvrir leurs besoins d'entretien et de production. Les veaux produits sur les exploitations vont devenir : 1) des futures reproductrices (phase d'élevage avec des rations fourragères pour les génisses de renouvellement), ou 2) des animaux lourds et finis destinés à l'abattage (phase d'engraissement). L'atelier d'engraissement nécessite l'apport d'aliments à plus forte concentration énergétique nécessaire à la finition des animaux. La population bovine allaitante est donc

alimentée avec des rations fourragères à basse teneur en énergie lors des phases d'élevage et de production, et avec des rations plus concentrées en énergie pour les phases d'engraissement.

La sélection génétique des bovins allaitants a pour objectif 1) d'améliorer les qualités maternelles et 2) d'augmenter le potentiel de croissance ainsi que la production de viande (Griffon *et al.*, 2017). Pour ce dernier point, le poids au sevrage des veaux a augmenté au cours des quinze dernières années. Ainsi, dans les trois plus grandes races allaitantes, le poids à 210 jours a augmenté en quinze ans d'environ 30 kg grâce à l'alimentation et à la gestion du troupeau mais également au progrès génétique qui contribue pour + 16,0 kg en race Limousine, + 11,5 kg en race Charolaise et + 9,5 kg en race Blonde d'Aquitaine (Griffon *et al.*, 2017). Le poids de la carcasse des jeunes bovins a également évolué ces dernières décennies, aug-

mentant de 59 kg en moyenne entre 1996 et 2021 (Chotteau *et al.*, 1997 ; Mazars *et al.*, 2022). Le format des vaches s'est également développé car le poids de carcasse des vaches finies est passé entre 2008 et 2021 de 432 à 465 kg en race Charolaise, de 398 à 453 kg en race Limousine et de 475 à 534 kg en race Blonde d'Aquitaine (Belveze *et al.*, 2012 ; Mazars *et al.*, 2022). Cette augmentation des poids ainsi que l'augmentation de la densité énergétique des rations pour exprimer au maximum le potentiel génétique des animaux ont entraîné une utilisation accrue des concentrés. Les concentrés sont utilisés non seulement pour la phase d'engraissement des animaux mais de plus en plus chez les brouards pour les vendre plus lourds au sevrage. C'est ainsi que dans les élevages naisseurs engraisseurs du Grand Ouest, la quantité de concentrés donnée par UGB a augmenté de 630 à 810 kg de 1998 à 2013 (Inosys Réseau Élevage, 2016).

Compte tenu de l'augmentation des prix des céréales, l'amélioration de l'efficacité alimentaire (définie dans l'**encadré 1**) en engraissement devient de plus en plus prioritaire pour les organismes de sélection des races à viande en France. L'amélioration de l'efficacité ne peut cependant se cantonner à celle des seuls bovins en engraissement, puisque le troupeau de femelles doit aussi utiliser et valoriser au maximum les surfaces en herbe ou des coproduits de l'industrie agro-alimentaire riches en cellulose. Cette amélioration doit donc concerner les deux phases : d'une part l'élevage des femelles de renouvellement et reproductrices ; et d'autre part l'engraissement des animaux pour leur finition. L'efficacité alimentaire peut être améliorée par les voies de la nutrition, des modes d'élevage et de la sélection génétique (Cantalapiedra-Hijar *et al.*, 2021).

Pendant 35 années, pour les races Charolaise, Limousine, Blonde d'Aquitaine et Rouge des Près, le Contrôle Individuel (CI) en station des taureaux reproducteurs a permis la mesure de l'efficacité alimentaire, en utilisant la Consommation Moyenne Journalière Résiduelle (CMJR), avec un aliment complet condensé distribué par un automate. Bien que de la paille soit aussi fournie aux animaux, l'ingestion de cet aliment n'est pas enregistrée (FGE, 2016). Le manque d'exhaustivité dans l'enregistrement de l'ensemble de la ration des taureaux a participé à la faible valorisation de cette évaluation génétique. D'une part, l'efficacité alimentaire peut être mal estimée car seule l'ingestion de l'aliment complet condensé est prise en compte alors que la consommation de paille se situe entre 3 et 4 kg MS/j selon les individus. D'autre part, une interaction génotype \times milieu peut exister entre l'efficacité mesurée en station (avec un aliment peu encombrant) et celle réalisée chez les éleveurs producteurs de viande bovine (avec des aliments plus encombrants).

INRAE a défini des axes de recherche pour mieux comprendre et améliorer l'efficacité alimentaire dans les populations animales. Un de ces axes porte sur sa caractérisation phénotypique et génétique dans des systèmes

alimentaires et à des stades physiologiques différents (Phocas *et al.*, 2014). Cela constitue un des objectifs du programme BEEFALIM 2020 (détail du programme dans l'article de Taussat *et al.*, 2023, ce numéro) qui visait à étudier la possibilité d'améliorer génétiquement l'efficacité alimentaire des bovins allaitants dans un contexte où une même population doit être efficace à la fois dans la phase d'élevage, avec des rations fourragères, et dans la phase d'engraissement, avec des rations concentrées, tout en utilisant les taureaux mesurés en station CI (avec un aliment peu encombrant). Cette étude avait donc pour but principal d'étudier, à travers l'estimation des paramètres génétiques, la pertinence du dispositif actuel en stations de CI, pour sélectionner sur l'efficacité alimentaire en tenant compte des différentes conditions de milieu.

1. Matériel et méthodes

■ 1.1. Le dispositif animal

BEEFALIM 2020 est un programme démarré en 2015 qui visait à appréhender les déterminants physiologiques et génétiques de l'efficacité alimentaire des bovins viande en s'appuyant sur la compréhension des mécanismes biologiques qui déterminent des différences individuelles d'efficacité. La race Charolaise est la seule race étudiée dans

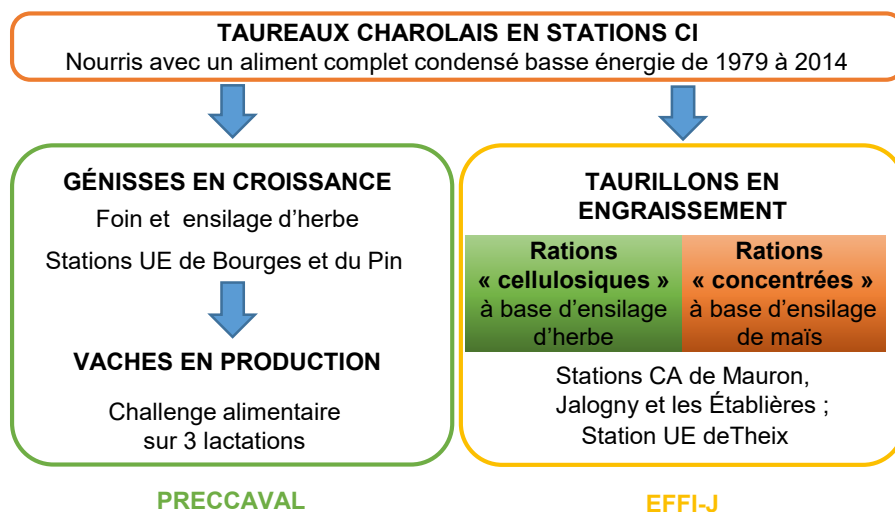
ce projet afin de maximiser les effectifs pour réaliser les analyses.

Le phénotypage des animaux du programme s'est concentré sur les deux modes d'élevage des bovins allaitants (**figure 1**), à savoir la phase d'élevage pour les génisses en croissance et les vaches en production (dispositif PRECCAVAL) et la phase d'engraissement des taurillons (dispositif EFFI-J). L'utilisation des taureaux de CI permet de connecter génétiquement l'ensemble des dispositifs afin d'estimer les relations génétiques entre l'efficacité alimentaire des taureaux et celles de leurs descendants mâles et femelles.

a. Les taureaux de testage

Le protocole de testage des taureaux en station de CI est détaillé dans le référentiel de France Génétique Élevage (FGE, 2016). Entre 1979 et 2014, les coopératives d'Insémination Animale (IA) françaises ont acheté des veaux charolais mâles candidats (selon leurs ascendances et leurs performances au sevrage) dans des fermes après leur sevrage à un âge moyen de 298 ± 33 jours. Environ 130 animaux par année ont été testés dans trois puis deux stations de contrôle des performances afin de sélectionner pour l'IA les animaux correspondants aux objectifs de sélection fixés. À leur arrivée en station, les veaux ont été répartis dans des groupes de contemporains en fonction de leur âge et de leur poids. Les

Figure 1. Le dispositif BEEFALIM 2020.



UE : Unité Expérimentale ; CA : Chambre d'Agriculture.

veaux ont eu une période d'adaptation de leur régime alimentaire d'au moins 4 semaines, avant d'être testés pendant au moins 12 semaines. Pendant la période d'adaptation, les veaux sont passés d'un régime à base de fourrage grossier à un régime complet utilisé lors de la phase de testage sous forme de granulés composé de 29 % de foin de luzerne déshydraté, 29 % de pulpe de betterave déshydratée et 21 % de son de blé, plus d'autres ingrédients pour assurer une ration équilibrée. Les jeunes taureaux étaient ensuite alimentés *ad libitum* avec ce concentré et de la bonne paille pendant la phase de testage. La valeur énergétique de l'aliment complet condensé était de 0,73 Unité Fourragère Viande (UFV)/kg. La composition de l'aliment granulé est restée constante au fil des années (mais pas la qualité ni la valeur de la paille) et pour les différentes stations, avec au moins trois contrôles en laboratoire de sa composition pendant la période de contrôle. Des Distributeurs Automatiques de Concentré (DAC) assuraient la distribution individuelle des granulés à chaque animal. Les distributeurs étaient calibrés au moins une fois par mois pour assurer une distribution précise. Les animaux avaient également accès à la paille à volonté mais aucune mesure d'ingestion individuelle de cet aliment (entre 3 et 4 kg MS/j) n'a été réalisée. Pour mesurer la croissance, tous les animaux ont été pesés deux jours consécutifs pour établir leur poids initial, puis tous les 28 jours pendant toute la durée du test. À la fin de l'essai, ils ont été pesés à nouveau pendant deux jours consécutifs pour établir leur poids final. Au total, les données de 4 675 animaux ont été conservées pour les analyses.

b. Les taurillons du dispositif EFFI-J

Entre 2015 et 2020, 639 veaux sevrés ont été achetés dans des fermes commerciales et engraisés en 13 séries réparties dans quatre fermes expérimentales (les ateliers d'engraissement des Chambres d'Agriculture à Mauron (56), Jalogny (71) et Les Établières (85) et le site de Theix (63) de l'unité expérimentale INRAE Herbipôle (<https://doi.org/10.15454/1.5572318050509348E12>)) (tableau 1). Ces animaux ont été préférentiellement choisis parmi les fils des taureaux évalués en CI par les deux entreprises de sélection partenaires, Charolais Diffusion et Charolais Univers, pour maximiser la connexion entre les séries et également pour estimer les relations génétiques entre l'efficacité alimentaire des pères et celle des descendants. Pour cela, 24 taureaux ayant suffisamment de descendants mâles en ferme ont été identifiés.

L'allotement des animaux a été réalisé suivant leur âge et leur poids à l'entrée en station. Ils ont été répartis par case (environ 8 animaux) en tenant compte également de leur origine paternelle afin de distinguer l'influence génétique du père de celle du milieu d'élevage. Après une période d'adaptation d'un mois environ, les taurillons ont commencé leur engraissement à un âge moyen de 303 (± 25) jours et ont reçu une alimentation *ad libitum* soit à base d'ensilage d'herbe, soit à base d'ensilage de maïs, produits sur les exploitations. La ration est présentée en détail dans l'article de Taussat *et al.* (2023, ce numéro) mais brièvement, le régime maïs était composé de 62 % d'ensilage de maïs en moyenne pour une densité énergétique de 0,91 UFV/kg MS et le régime herbe était composé de 60 %

d'ensilage d'herbe en moyenne pour une densité énergétique de 0,88 UFV/kg MS. La consommation journalière individuelle a été enregistrée avec des auges peseuses automatiques (Biocontrol, Rakkestad, Norway). Les animaux ont été pesés deux jours de suite au début et à la fin de la phase de contrôle, et également tous les 14 jours durant la période de contrôle. Les taurillons ont fini leur engraissement quand ils atteignaient un poids final entre 700 et 750 kg correspondant à environ 450 kg de carcasse. Pour atteindre ce poids final, les taurillons nourris à l'ensilage de maïs ont été plus rapides (216 ± 32 jours de contrôle) par rapport à ceux nourris à l'ensilage d'herbe (240 ± 45 jours de contrôle).

c. Les génisses du dispositif PRECCAVAL

Un total de 569 génisses a été utilisé dans cette expérimentation entre 2012 et 2015 (tableau 2), réparti dans deux unités expérimentales d'INRAE : 297 à la station de Bourges (18) (<https://doi.org/10.15454/1.5483259352597417E12>) et 272 à la station du Pin-au-Haras (61) (<https://doi.org/10.15454/1.5483257052131956E12>). Dans chaque station, ces génisses étaient nées de vaches inséminées avec 53 mâles Charolais connus (dont 39 taureaux de CI communs avec les taurillons du dispositif EFFI-J). Les génisses procréées dans chaque station étaient nées en deux lots à quatre mois d'intervalle, elles ont été sevrées à 7,5 mois et alimentées avec des rations à base de fourrages grossiers et d'herbe pâturée jusqu'à leur entrée en suivi expérimental à l'âge moyen de 21 mois sans être mises à la reproduction.

Après une période d'adaptation de 4 semaines, les génisses ont commencé la phase de contrôle de l'ingestion à l'âge de 676 jours en moyenne

Tableau 1. Effectif d'animaux engraisés dans chaque ferme expérimentale en fonction des campagnes expérimentales.

Site/Année	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020
Mauron (56)	48	46	51	45	
Jalogny (71)		51	49	51	
Établières (85)		56	63	55	
Theix (63)	24			49	51

Tableau 2. Effectif des génisses contrôlées dans chaque station expérimentale en fonction des campagnes expérimentales.

Site/Année	2012	2013	2014	2015
Bourges (18)	68	78	87	64
Pin-au-Haras (61)	48	77	74	73

(± 18 jours), pendant une durée de 12 semaines, avec mesure individuelle et manuelle de l'ingestion. Chaque jour, la quantité d'aliment distribuée était pesée et les refus dans chaque auge étaient mesurés trois fois par semaine (lundi, mercredi et vendredi). La teneur en Matière Sèche (MS) des apports et des refus était mesurée trois fois par semaine. Les génisses ont été nourries *ad libitum* avec un ensilage d'herbe à la station de Bourges (0,79 UFV/kg MS) et avec du foin à la station du Pin-au-Haras (0,51 UFV/kg MS). En complément du foin, les génisses du Pin ont reçu 1 kg de concentré composé de tourteau de soja, maïs, son de blé et mélasse (1,05 UFV/kg MS). Les génisses ont été pesées deux fois consécutivement sur deux jours au début et à la fin du contrôle ainsi que tous les 14 jours durant la phase de contrôle de l'ingestion.

■ 1.2. Description des trois jeux de données

La période de contrôle des taurillons du dispositif EFFI-J a été ajustée. Pour éviter des durées d'engraissement différentes au sein d'une même série, nous avons pris la décision d'analyser l'efficacité alimentaire sur une même durée pour tous les animaux d'une même série. Pour cela les durées ont été tronquées en utilisant la date de fin des premiers animaux sortis. Ainsi, seule subsistait une variabilité inter-série de la durée de contrôle, dépendante de l'environnement de la série et non du choix lié au régime alimentaire utilisé et de la date de fin d'engraissement (199 ± 25 jours de contrôle pour les deux régimes).

Pour les taureaux de CI, comme pour les taurillons du dispositif EFFI-J et les génisses du dispositif PRECCAVAL, le Poids initial et Final (PF) ainsi que le Gain Moyen Quotidien (GMQ) sur la période de contrôle ont été calculés pour chaque animal à partir d'une régression de leurs poids mesurés sur le temps. Le Poids Moyen Métabolique (PMM) a été calculé en faisant la moyenne des poids initiaux et finaux, élevée à la puissance 0,75. Les consommations journalières individuelles brutes ont été converties en MS, additionnées puis divisées par le nombre de jours de contrôle pour obtenir une Consommation Moyenne

Journalière (CMJ) sur toute la période. Pour étudier l'efficacité alimentaire, trois critères ont été utilisés : la CMJR, le Gain Moyen Quotidien Résiduel (GMQR) et le ratio d'efficacité alimentaire (EA) (encadré 1). La CMJR a été calculée comme la résiduelle de la régression de CMJ sur PMM (prédicteur des besoins d'entretien) et GMQ (prédicteur des besoins de croissance) en utilisant Proc GLM dans le logiciel SAS/STAT, version 9,4 sur Linux (Copyright 2002 to 2012 by SAS Institute Inc., Cary, NC). Chaque population ayant suivi des protocoles spécifiques (concernant l'âge à l'entrée, le régime, la durée de contrôle...), un modèle de régression a été construit par population en testant l'inclusion de différentes variables. Trois modèles différents ont donc été utilisés :

Les taureaux de CI (modèle 1) :

$$CMJ = GC + \beta_1(PMM) + \beta_2(GMQ) + \beta_3(\text{âge}) + CMJR$$

Les taurillons du dispositif EFFI-J (modèle 2) :

$$CMJ = GC + \beta_1(PMM) + \beta_2(GMQ) + CMJR$$

Les génisses du dispositif PRECCAVAL (modèle 3) :

$$CMJ = GC + \beta_1(PMM) + \beta_2(GMQ)[\text{ferme}] + CMJR$$

avec GC l'effet fixe du groupe de contemporains (combinaison de la station, de la série et de la case pour les taureaux de CI ; combinaison de la station, de la série, du régime et de la case pour les taurillons ; combinaison de la station et de la campagne pour les génisses), β_1 la régression partielle de la CMJ sur le PMM, β_2 la régression partielle de la CMJ sur le GMQ (avec une régression intra-ferme pour les génisses) et β_3 la régression partielle de la CMJ sur l'âge au début du contrôle pour les taureaux de CI. De façon similaire, le GMQR a été calculé par régression du GMQ sur le PMM, la CMJ et l'âge au début de contrôle, et en incluant pour chaque population l'effet groupe de contemporains comme défini précédemment. Enfin, l'EA est égal au GMQ divisé par la CMJ.

■ 1.3. Analyses statistiques

a. Analyses spécifiques intra-populations

Des analyses spécifiques intra-populations ont été réalisées. Pour les taurillons du dispositif EFFI-J, l'effet du régime sur les performances mesurées lors de la phase de contrôle a été estimé à l'aide de la procédure GLM de SAS, en expliquant chaque variable par un modèle ANOVA incluant l'effet du régime et le groupe de contemporains. Le protocole étant identique entre les stations, l'effet de ces dernières ($n = 4$) s'est avéré non significatif et ne sera pas présenté dans l'article.

Pour les génisses du dispositif PRECCAVAL, un régime spécifique par ferme a été utilisé lors de la phase de contrôle alimentaire. L'effet de la ferme a donc été testé à l'aide d'un modèle ANOVA dans le logiciel SAS.

b. Les paramètres phénotypiques et génétiques

Pour chaque population, les corrélations phénotypiques entre tous les caractères étudiés ont été calculées à l'aide du logiciel SAS et en corrigeant au préalable les phénotypes de l'effet du groupe de contemporains (combinaison de la série et de la case) et de l'âge au début du contrôle pour les taureaux de CI ; l'effet groupe de contemporains (combinaison de la station, de la série, du régime et de la case), de l'âge en début de contrôle (en covariable) et de l'effet aléatoire de l'élevage de naissance combiné à la campagne pour les taurillons EFFI-J ; l'effet groupe de contemporains (combinaison de la station et de la campagne), la gémellité, l'âge de la mère au vêlage et l'âge au début de contrôle pour les génisses du dispositif PRECCAVAL.

Les paramètres génétiques (héritabilités et corrélations génétiques) ont été estimés à l'aide du logiciel WOMBAT (Meyer, 2007) en utilisant la méthode du REML. Le modèle utilisé pour les animaux était le même que celui pour la correction des phénotypes, en ajoutant l'effet génétique *via* l'inclusion de la généalogie de chaque individu. Pour

Encadré 1. Les différents critères d'efficacité alimentaire.

L'efficacité est le rapport entre les résultats obtenus par un système et les ressources utilisées pour obtenir ce résultat. Un système est efficace si, pour un même résultat, il a consommé moins de ressources, ou inversement si pour une même quantité de ressources, il a obtenu de meilleurs résultats. À l'échelle d'un jeune bovin en croissance, l'efficacité alimentaire se caractérise par la relation entre l'ingestion d'aliment (les ressources) et la croissance (les résultats). Plusieurs indicateurs existent pour exprimer les relations entre les ressources et les résultats à l'échelle de l'animal.

1. Les ratios

Les ratios utilisés pour exprimer l'efficacité alimentaire des animaux mettent en relation les ressources et les résultats par le calcul d'un rapport. Le ratio d'efficacité alimentaire est la division de la croissance par l'ingestion et représente la quantité de gain de croît réalisé par unité d'ingestion (on cherchera donc à l'augmenter). Son inverse, l'indice de consommation, exprime la capacité de l'animal à convertir l'aliment ingéré en gain de poids (on cherchera donc à le diminuer).

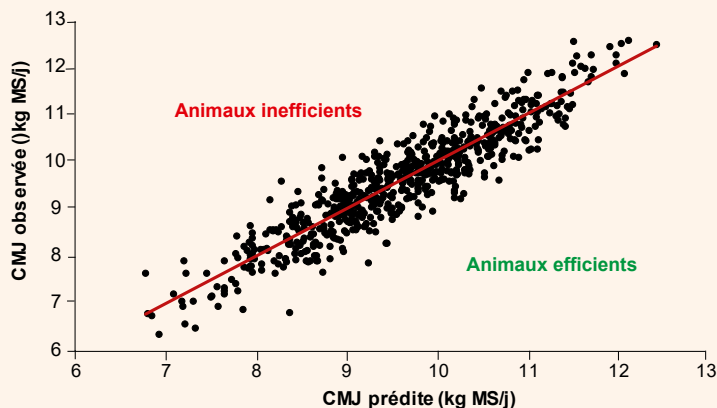
2. Les régressions

Les ratios ne prennent pas en compte les besoins d'entretien des animaux pour expliquer les différences d'ingestion. Afin d'estimer la quantité d'aliment alloué par l'animal dans les besoins d'entretien et de croissance, Koch *et al.* (1963) ont proposé une régression linéaire.

a. La consommation moyenne journalière résiduelle (CMJR)

Elle représente la différence entre la consommation observée de l'animal et la consommation prédite, à partir de l'estimation simplifiée des besoins énergétiques de l'animal. Cette différence exprime le niveau d'efficacité de l'animal, indépendamment de ses besoins, pour savoir s'il optimise l'aliment ingéré ou s'il le gaspille. Si la différence (ou résiduelle) est positive, l'animal a consommé plus d'aliment que prédit au regard de ses performances : il est considéré inefficace ou gaspilleur. En revanche, si l'animal consomme moins que ce qui est prédit, il sera considéré comme efficace.

Relation entre la consommation moyenne journalière (CMJ) prédite et observée dans la population des taurillons du dispositif EFFI-J (N = 639)

**b. Le gain moyen quotidien résiduel (GMQR)**

Il représente la différence entre la croissance observée de l'animal et la croissance prédite, à partir de son niveau d'ingestion en tenant compte des besoins énergétiques d'entretien. Cette différence exprime le niveau d'efficacité de la croissance de l'animal, indépendamment de son métabolisme de base et de ses ressources, pour savoir s'il optimise ou non sa croissance. L'interprétation de ce critère est différente de celle de la CMJR. Si la résiduelle est positive, l'animal a une croissance supérieure par rapport à son ingestion et ses besoins d'entretien : il sera considéré efficace. Si à l'opposé elle est négative, l'animal sera considéré inefficace.

chaque population, un modèle animal monocaractère a été utilisé pour estimer les héritabilités des caractères (rapport entre la variance génétique et la variance phénotypique) et un modèle bicaractère pour estimer les corrélations génétiques (liaison entre les valeurs génétiques pour deux caractères différents). Entre les trois populations, un modèle animal tricaractère a été utilisé pour estimer les corrélations génétiques entre les caractères homologues.

2. Résultats**■ 2.1. Analyse descriptive intra-population****a. Les taureaux de Contrôle Individuel**

Les taureaux de CI ont commencé la période de test à 357 jours d'âge en moyenne, avec un écart-type d'environ un mois (35 j) autorisé par le protocole des stations. Le poids au

début du contrôle était en moyenne de 548 kg. Durant le contrôle individuel, les animaux ont ingéré en moyenne 11,4 kg MS/j de l'aliment condensé, ont eu une croissance de 1,46 kg/j pour un poids final de 730 kg (tableau 3). Après ajustement de l'effet du groupe de contemporains, le R^2 de la régression multiple de la CMJ sur le PMM et le GMQ (modèle 1) était de 0,64. Pour le GMQR, le R^2 du modèle linéaire était de 0,53.

Tableau 3. Moyenne et écart-type des caractères étudiés chez les taureaux de CI et les taurillons du dispositif EFFI-J.

Caractère	Taureaux de CI (n = 4 675)		Taurillons EFFI-J (n = 639)	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
Âge au début (j)	357	35	303	25
Poids au début (kg)	548	58	393	59
CMJ (kg MS/j)	11,40	1,15	9,61	1,11
GMQ (kg/j)	1,46	0,23	1,50	0,28
Âge de fin (j)	481	36	502	28
PF (kg)	730	66	695	74
EA (kg/kg MS)	0,13	0,02	0,16	0,03
CMJR (kg MS/j)	0,00	0,47	0,00	0,44
GMQR (kg/j)	0,00	0,18	0,00	0,13

CMJ : Consommation Moyenne Journalière ; GMQ : Gain Moyen Quotidien ; PF : Poids Final ; EA : ratio d'Efficiency Alimentaire ; CMJR : Consommation Moyenne Journalière Résiduelle ; GMQR : Gain Moyen Quotidien Résiduel.

b. Les taurillons

Les taurillons du dispositif EFFI-J ont commencé leur engraissement à l'âge de 303 j en moyenne, pour un poids initial moyen de 393 kg (tableau 3). Pendant la période de contrôle, les animaux ont consommé 9,61 kg MS/j en moyenne et ont eu une croissance de 1,50 kg/j en moyenne. Les taurillons ont converti en moyenne un kg d'aliment en 0,16 kg de croissance (EA). La période de contrôle s'est terminée à l'âge moyen de 502 jours avec un poids final moyen de 695 kg. Après ajustement de l'effet du groupe de contemporains, le R^2 de la régression multiple de la CMJ sur le PMM et le GMQ était de 0,69 (modèle 2). Pour le GMQR, le R^2 du modèle était de 0,41.

Étude de l'effet régime

Une répartition équitable des animaux selon le régime a été réalisée, à savoir 319 taurillons nourris avec de l'ensilage de maïs et 320 avec de l'ensilage d'herbe. L'analyse de variance a montré que les animaux nourris à l'ensilage de maïs ont significativement consommé plus d'aliment (9,81 kg MS/j contre 9,41 kg MS/j, $P < 0,0001$) sur la période, ont réalisé

une meilleure croissance (1,62 kg/j contre 1,39 kg/j, $P < 0,0001$) et ont eu un poids final plus élevé (720 kg contre 670 kg, $P < 0,0001$) (tableau 4). Malgré une ingestion supérieure, l'ensilage de maïs a donné lieu à une meilleure efficacité alimentaire du fait d'un plus fort effet sur la croissance des animaux grâce à un apport énergétique plus important. Le ratio d'efficacité alimentaire des animaux nourris à l'ensilage de maïs était supérieur de 20 g de croissance/jour par kg de MS ingéré (+ 13 %) par rapport aux animaux nourris à l'herbe. De manière générale l'ensilage de maïs a augmenté significativement les performances des animaux.

c. Les génisses

Les génisses du dispositif PRECCAVAL ont commencé la phase de contrôle à l'âge de 676 jours en moyenne, pour un poids initial d'environ 495 kg. Elles ont consommé en moyenne 8,50 kg MS/j sur toute la période, avec une croissance modérée de 0,68 kg/j et un poids moyen de 521 kg. Les génisses ont converti en moyenne un kg d'aliment en 0,08 kg de croissance. Les R^2 des régressions multiples sont plus faibles comparés aux deux populations mâles :

celui de la CMJ (modèle 3) était de 0,28 et celui du GMQ était de 0,14.

L'âge et le poids des génisses au début du contrôle étaient identiques entre les deux fermes (tableau 5). Cependant, pendant la période de test, l'alimentation utilisée pour nourrir les génisses a entraîné des différences de performances. En effet, les femelles alimentées au foin dans la ferme du Pin ont eu une ingestion inférieure (- 0,52 kg MS/j), un poids plus faible (- 23 kg), une moindre croissance (- 496 g/j) et donc une EA inférieure (- 0,06 kg/kg MS) à celles alimentées à l'ensilage d'herbe dans la ferme de Bourges. De plus, l'EA pour les génisses de Bourges (0,11) est proche de celui des taureaux de CI (0,13). Ces baisses significatives de performances ont également entraîné une diminution de la variabilité phénotypique de la CMJR, avec une réduction de moitié par rapport aux génisses de la ferme de Bourges. Les faibles croissances constatées au Pin, et donc les faibles efficacités de conversion des aliments, peuvent s'expliquer par l'aliment grossier faiblement énergétique qui ne permet pas la pleine expression du potentiel de croissance.

Tableau 4. Effet du régime alimentaire sur les performances des taurillons du dispositif EFFI-J.

Caractère	Ensilage de maïs (n = 319)		Ensilage d'herbe (n = 320)		P-value
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	
CMJ (kg MS/j)	9,81	1,02	9,41	1,17	< 0,0001
GMQ (kg/j)	1,62	0,21	1,39	0,29	< 0,0001
PF (kg)	720	68	670	73	< 0,0001
EA (kg/kg MS)	0,17	0,02	0,15	0,02	< 0,05
CMJR (kg MS/j)	0,00	0,43	0,00	0,44	–
GMQR (kg/j)	0,00	0,13	0,00	0,13	–

CMJ : Consommation Moyenne Journalière ; GMQ : Gain Moyen Quotidien ; PF : Poids Final ; EA : ratio d'Efficiency Alimentaire ; CMJR : Consommation Moyenne Journalière Résiduelle ; GMQR : Gain Moyen Quotidien Résiduel.

Tableau 5. Moyenne, écart-type et analyse statistique des performances des génisses durant le contrôle en fonction des fermes.

	Bourges (n = 297)		Le Pin (n = 272)		P-value
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	
Âge au début (j)	678	17	673	20	0,10
Poids initial (kg)	498	51	492	46	0,38
CMJ (kg MS/j)	8,75	1,52	8,23	0,80	< 0,0001
GMQ (kg/j)	0,918	0,237	0,422	0,161	< 0,0001
PF (kg)	575	55	527	47	< 0,0001
EA (kg/kg MS)	0,11	0,03	0,05	0,02	< 0,0001
CMJR (kg MS/j)	0,00	1,03	0,00	0,53	–
GMQR (kg/j)	0,00	0,14	0,00	0,14	–

CMJ : Consommation Moyenne Journalière ; GMQ : Gain Moyen Quotidien ; PF : Poids Final ; EA : ratio d'Efficiency Alimentaire ; CMJR : Consommation Moyenne Journalière Résiduelle ; GMQR : Gain Moyen Quotidien Résiduel.

■ 2.2. Les paramètres phénotypiques et génétiques

a. Intra-population

Le nombre d'animaux étant plus important pour les taureaux de CI, les paramètres génétiques ont été estimés avec plus de précision que pour les taurillons et les génisses, avec des erreurs standard moins élevées (tableau 6). Dans les deux populations mâles, l'estimation de l'héritabilité était proche pour la CMJ ($0,36 \pm 0,05$ pour les

taureaux de CI et $0,37 \pm 0,14$ pour les taurillons) et pour le GMQ ($0,27 \pm 0,04$ pour les taureaux de CI vs $0,31 \pm 0,13$ pour les taurillons). En revanche, pour ces deux caractères, les héritabilités estimées sont nettement plus faibles pour les génisses ($0,12 \pm 0,09$ pour la CMJ ; $0,01 \pm 0,08$ pour le GMQ). Dans les trois populations, les héritabilités des poids sont modérées, allant de $0,26$ pour les taurillons à $0,37$ pour les taureaux de CI. Pour les trois caractères d'efficacité alimentaire, les coefficients

d'héritabilité sont plus élevés pour les taureaux de CI que pour leurs descendants mâles et femelles. De plus, l'héritabilité de la CMJR est toujours supérieure à celles du GMQR et de l'EA. Les héritabilités estimées pour les taureaux de CI des races Blonde d'Aquitaine et Limousine étaient également élevées, avec des héritabilités pour la CMJR de $0,26 (\pm 0,10)$ et $0,45 (\pm 0,18)$ respectivement et pour l'EA de $0,30 (\pm 0,12)$ et $0,15 (\pm 0,15)$ respectivement (Bouquet *et al.*, 2010). Berry et Crowley

Tableau 6. Héritabilités (sur la diagonale, \pm erreur standard), corrélations génétiques (au-dessus de la diagonale, \pm ES) et phénotypiques (en-dessous de la diagonale) entre les caractères intra-populations.

Les taureaux de CI						
Caractère	CMJ	GMQ	PF	CMJR	GMQR	EA
CMJ	0,36 \pm 0,05	0,66 \pm 0,06	0,84 \pm 0,03	0,84 \pm 0,03	0,10 \pm 0,11	0,09 \pm 0,11
GMQ	0,51***	0,27 \pm 0,04	0,64 \pm 0,06	0,15 \pm 0,11	0,81 \pm 0,04	0,81 \pm 0,04
PF	0,78***	0,58***	0,37 \pm 0,04	0,06 \pm 0,10	0,22 \pm 0,10	0,17 \pm 0,10
CMJR	0,62***	0,00	0,00	0,26 \pm 0,04	- 0,29 \pm 0,11	- 0,22 \pm 0,11
GMQR	0,00	0,85***	0,23***	- 0,39***	0,21 \pm 0,04	0,99 \pm 0,04
EA	0,03	0,86***	0,23***	- 0,34***	0,99***	0,23 \pm 0,04
Les taurillons du dispositif EFFI-J						
Caractère	CMJ	GMQ	PF	CMJR	GMQR	EA
CMJ	0,37 \pm 0,14	0,88 \pm 0,10	0,90 \pm 0,07	0,73 \pm 0,17	0,37 \pm 0,36	0,28 \pm 0,43
GMQ	0,64***	0,31 \pm 0,13	0,80 \pm 0,13	0,57 \pm 0,27	0,77 \pm 0,16	0,71 \pm 0,24
PF	0,82***	0,71***	0,26 \pm 0,12	0,34 \pm 0,31	0,33 \pm 0,31	0,17 \pm 0,45
CMJR	0,56***	0,00	- 0,01	0,21 \pm 0,10	0,10 \pm 0,41	0,13 \pm 0,47
GMQR	0,01	0,77***	0,27***	- 0,49***	0,13 \pm 0,09	1,00 \pm 0,02
EA	- 0,11***	0,69***	0,13***	- 0,49***	0,98***	0,10 \pm 0,08
Les génisses du dispositif PRECCAVAL						
Caractère	CMJ	GMQ	PF	CMJR	GMQR	EA
CMJ	0,12 \pm 0,09	NE	0,45 \pm 0,31	0,62 \pm 0,27	NE	NE
GMQ	0,33***	0,01 \pm 0,08	NE	NE	NE	NE
PF	0,50***	0,33***	0,30 \pm 0,11	- 0,39 \pm 0,33	NE	NE
CMJR	0,84***	0,00	0,00	0,13 \pm 0,10	NE	NE
GMQR	0,00	0,91***	0,00	- 0,18***	0,00 \pm 0,08	NE
EA	- 0,27***	0,79***	0,04	- 0,50***	0,89***	0,00 \pm 0,08

*** : $P < 0,0001$; NE : Non Estimé.

CMJ : Consommation Moyenne Journalière ; GMQ : Gain Moyen Quotidien ; PF : Poids Final ; EA : ratio d'Efficiency Alimentaire ; CMJR : Consommation Moyenne Journalière Résiduelle ; GMQR : Gain Moyen Quotidien Résiduel.

(2013) ont recensé dans leur synthèse bibliographique des héritabilités pour la CMJR allant de 0,14 à 0,63. La plus faible héritabilité chez les descendants des taureaux de CI peut s'expliquer par le fait que les conditions de milieu (à

savoir le régime) ont été hétérogènes intra-dispositif.

Les corrélations génétiques du GMQ, du GMQR et de l'EA chez les génisses n'ont pas pu être estimées. Lancaster

et al. (2009), pour 468 génisses Brangus ayant commencé leur contrôle à 231 jours d'âge pendant 70 jours et nourries à base de luzerne et de maïs, ont estimé une héritabilité de 0,48 (\pm 0,14) pour la CMJ, 0,21 (\pm 0,12) pour

le GMQ, $0,35 (\pm 0,15)$ pour le poids final, $0,47 (\pm 0,13)$ pour la CMJR et $0,29 (\pm 0,12)$ pour l'EA. Ces résultats se rapprochent de ceux obtenus sur la voie mâle du dispositif. En revanche, Martin *et al.* (2019) ont estimé une héritabilité de $0,68$ pour le poids vif et des héritabilités entre $0,15$ et $0,20$ pour la CMJ, et entre $0,12$ et $0,13$ pour la CMJR, avec des femelles Charolaises de réforme nourries successivement avec du fourrage et de l'ensilage de maïs. Plus la croissance des animaux avance, plus la proportion protéique dans le GMQ baisse avec l'avancement du degré de maturité. Vers l'âge de deux ans, les gains sont majoritairement lipidiques et influencés principalement par l'environnement. Ces résultats confortent donc l'hypothèse que l'âge tardif des génisses de PRECCAVAL, couplé à l'alimentation plus ou moins énergétique, est à l'origine des estimations d'héritabilité faibles pour la CMJ et la CMJR et nulles pour le GMQ. Ce résultat est discuté en détail dans l'article de Martin *et al.* (2023, ce numéro).

Comme attendu par construction, les corrélations phénotypiques entre les deux résiduelles et leurs composants sont nulles. Chez les taureaux de CI, la CMJR n'est pas corrélée génétiquement avec le GMQ ($0,15 \pm 0,11$). Cependant, chez les taurillons, la CMJR semble être génétiquement corrélée au GMQ ($0,57 \pm 0,27$). Cela indique donc que dans la population des taurillons, une amélioration génétique de l'efficacité alimentaire par sélection pour une faible CMJR aurait tendance à une diminution de la croissance et du format des animaux. Hoque *et al.* (2006) et Nkrumah *et al.* (2007) ont également observé des relations positives entre la CMJR et le GMQ ($0,25 \pm 0,16$ et $0,46 \pm 0,45$ respectivement) mais avec des erreurs d'estimation élevées voire très élevées. Avec une meilleure précision, les résultats des taureaux de CI ne confirment pas cette relation défavorable entre la CMJR et le GMQ. Si l'on compare avec la relation entre le GMQR et la CMJ, il n'existe pas de corrélation génétique chez les taureaux de CI, mais une tendance existe pour une relation positive entre les deux caractères chez les taurillons en engraissement ($0,37 \pm 0,36$). Cependant, avec l'erreur d'estimation

associée, la relation génétique entre le GMQR et la CMJ n'est pas significative.

b. Inter-population

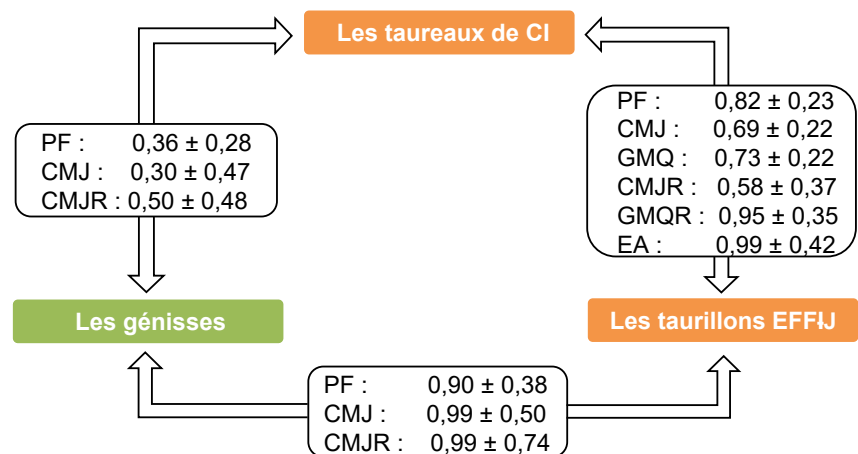
Entre les taureaux de CI et les taurillons du dispositif EFFI-J, la corrélation génétique la plus élevée est observée entre les deux poids finaux ($0,82 \pm 0,23$) puis entre les deux GMQ ($0,73 \pm 0,22$) et enfin entre les deux ingestions ($0,69 \pm 0,22$) (figure 2). Si ces corrélations sont fortement positives, elles sont néanmoins inférieures à celles estimées dans une étude précédente entre les taureaux de CI et des taurillons alimentés avec le même aliment condensé : $0,99 (\pm 0,14)$ pour le PF, $0,95 (\pm 0,19)$ pour GMQ et $0,96 (\pm 0,13)$ pour la CMJ (Taussat *et al.*, 2019).

Entre les critères d'efficacité alimentaire des taureaux de CI et les taurillons du dispositif EFFI-J, la corrélation est de $0,58 (\pm 0,37)$ pour CMJR, $0,95 (\pm 0,35)$ pour GMQR et $0,99 (\pm 0,42)$ pour EA. En dépit des différents régimes alimentaires et des conditions de milieux, les corrélations génétiques restent élevées entre les deux populations pour les deux GMQR et EA mais avec des précisions d'estimation faibles. En revanche, la corrélation génétique est plus faible pour la CMJR. Pour comparaison, dans l'étude de Taussat *et al.* (2019), la corrélation génétique estimée était de $0,80 (\pm 0,18)$ pour CMJR mais avec le même aliment complet condensé dans les deux populations.

Entre deux environnements différents, une corrélation génétique proche de 1 indique que le caractère est peu affecté par l'interaction génétique \times environnement (GxE), n'entraînant que peu de reclassement entre individus d'un environnement à l'autre. En revanche, ce reclassement sera d'autant plus important que la corrélation génétique diminuera. Mulder *et al.* (2006) ont établi qu'une corrélation génétique inférieure à $0,70-0,80$ révèle une interaction GxE qui nécessite l'utilisation de plusieurs schémas de sélection distincts, en fonction des environnements choisis. D'après nos résultats, puisque la corrélation génétique est faible, une interaction GxE aurait tendance à exister entre la CMJR des taureaux de CI et celle des taurillons du dispositif EFFI-J. Toutefois, cette interaction ne semble pas exister pour le GMQR et l'EA.

Les faibles héritabilités du GMQ, du GMQR et de l'EA chez les génisses n'ont pas permis d'estimer les corrélations génétiques avec les pères de CI. Concernant les autres caractères, les corrélations génétiques entre les taureaux de CI et les génisses ne semblent pas significative, malgré la tendance à avoir des relations positives entre les caractères. Avec de telles marges d'erreur, il est impossible de conclure à la présence d'un lien génétique entre l'efficacité alimentaire des taureaux et celle des génisses.

Figure 2. Corrélations génétiques estimées (\pm ES) entre les populations.



CMJ : Consommation Moyenne Journalière ; GMQ : Gain Moyen Quotidien ; PF : Poids Final ; EA : ratio d'Efficiency Alimentaire ; CMJR : Consommation Moyenne Journalière Résiduelle ; GMQR : Gain Moyen Quotidien Résiduel.

Entre les taurillons du dispositif EFFI-J et les génisses du dispositif PRECCAVAL, les corrélations génétiques entre les GMQ, les GMQR et les EA n'ont également pas pu être estimées. Pour les autres caractères, les valeurs sont toutes accompagnées d'erreur d'estimation élevée. Hormis la corrélation entre les deux PF qui semble être positive et significative, les corrélations entre les CMJ et les CMJR ne sont malheureusement pas interprétables. En comparaison aux taureaux de CI, le nombre plus faible d'animaux dans les deux populations réduit la puissance statistique et donc nous empêche de conclure sur une potentielle relation génétique entre l'efficacité alimentaire des taurillons et des génisses.

3. Stratégie pour mettre en place une sélection génétique de l'efficacité alimentaire

■ 3.1 Quel critère utiliser pour satisfaire toutes les productions ?

Si une sélection sur l'efficacité alimentaire est mise en place, il est important de se demander quel critère est le plus pertinent à utiliser pour améliorer la performance des animaux. Une même population allaitante doit être efficace aussi bien dans la phase d'élevage des génisses et dans la phase de production des vaches que dans la phase d'engraissement finale (de tous les animaux). Si un critère est choisi, il doit impérativement satisfaire à la fois les éleveurs naisseurs et les éleveurs engraisseurs.

La CMJR permet de distinguer les animaux gaspilleurs et économes sur l'ingestion, sans influencer phénotypiquement la croissance et le format. Ce caractère s'il est conservé toute la vie des vaches, et qu'il n'affecte pas la production de lait ni la reproduction, peut être intéressant pour les éleveurs naisseurs qui produisent et élèvent des animaux. Si un éleveur utilise des femelles pour faire par exemple trois vêlages, il préférera des animaux qui consomment moins d'aliment tout en produisant les trois veaux car la période de production

est fixe. En revanche, ce caractère n'est pas nécessairement intéressant pour les engraisseurs car ils peuvent préférer des animaux à forte croissance pour atteindre rapidement le stade d'abattage, correspondant généralement à un poids fixé. Si les animaux atteignent rapidement ce poids, ils resteront moins longtemps en engraissement (permettant ainsi de réduire les coûts de production) et leurs besoins d'entretien en seront d'autant réduits : ils consommeront donc moins d'aliment au total pendant leur engraissement (quitte à ce que l'ingestion journalière soit importante). Les engraisseurs se dirigeront donc plutôt vers le GMQR ou l'EA.

Pour satisfaire les éleveurs naisseurs et les engraisseurs, Berry et Crowley (2012) ont proposé un critère pour cumuler les avantages de la CMJR et du GMQR : une combinaison des Consommations et Gains Résiduels (CGR) ou « *Residual Intake and Gain* » (RIG) en anglais. Ce critère est une combinaison linéaire de la CMJR et du GMQR avec un poids de -1 pour la CMJR, car les valeurs négatives sont favorables, et avec un poids de 1 pour le GMQR, car les valeurs positives sont favorables. Ce caractère permet donc de discriminer les animaux à la fois économes en ressources et à forte vitesse de croissance, sans conséquence sur le poids métabolique par construction. Dans leur étude, Berry et Crowley (2012) ont estimé une corrélation génétique de $-0,35$ entre le CGR et la CMJ et $0,47$ entre le CGR et le GMQ. De plus, ils montrent sur leur population de jeunes bovins que pour un gain de 300 kg de poids vif, le top 10% des animaux efficaces sur ce critère CGR est celui qui consomme le moins d'aliment sur la période d'engraissement ($1\,446$ kg MS contre $1\,474$ kg MS pour le top 10% des animaux selon le GMQR et $1\,619$ kg MS pour le top 10% des animaux selon la CMJR). Cependant les animaux sélectionnés sur le CGR mettaient 11 jours de plus pour atteindre le poids objectif que le top 10% des animaux sélectionnés sur le GMQR, mais 30 jours de moins que le top 10% des animaux sélectionnés sur la CMJR. Selon que l'objectif fixé est un poids donné ou un temps de production, le caractère utilisé pour la sélection sera différent car chacun aura ses avantages

et ses inconvénients. Utiliser le critère du CGR serait une bonne alternative pour satisfaire l'amélioration de l'efficacité des génisses d'élevage comme celle des animaux en engraissement. Cette étude dans BEEFALIM 2020 avait pour objectif de comprendre le déterminisme génétique de chaque critère d'efficacité alimentaire, il ne fût donc pas question d'étudier une combinaison linéaire de deux critères, qui peut s'apparenter à un index de sélection.

■ 3.2. Utilisation d'un critère ou d'un index de sélection ?

À première vue, l'inclusion de l'efficacité alimentaire dans l'objectif de sélection peut sembler relativement simple. Cependant, plusieurs facteurs compliquent l'inclusion de ce caractère dans un objectif de sélection équilibré. Si on prend l'exemple de la croissance, la volonté d'améliorer le gain de poids par unité d'ingestion suggère l'utilisation d'un ratio comme l'EA ou l'indice de consommation. Ce critère est très compréhensible par les professionnels et facilement calculable. Cependant les réponses à la sélection sur ce critère sont imprévisibles car on ne sait pas si on augmente le numérateur (GMQ) ou si on diminue le dénominateur (CMJ).

L'utilisation de la CMJR ou du GMQR ne présente pas cet inconvénient car elle permet d'avoir un critère phénotypiquement non corrélé à ses composantes. Toutefois, Kennedy *et al.* (1993) ont montré que l'indépendance phénotypique n'est pas forcément synonyme d'indépendance génétique. C'est ainsi que pour les taurillons du dispositif EFFI-J, des relations génétiques positives ont été mises en évidence entre la CMJR et le GMQ. Une sélection pour diminuer la CMJR induirait également une diminution de la croissance et du format des animaux. Cependant, les erreurs d'estimation étaient élevées dans la population des taurillons et ces tendances n'ont pas été trouvées chez les taureaux de CI. Néanmoins, à l'inverse de l'EA, la CMJR et le GMQR sont difficiles à expliquer et à faire comprendre aux éleveurs qui ont l'habitude de travailler avec des phénotypes directement mesurables et non élaborés par des modèles statistiques.

C'est une des conclusions de l'étude de Wulfhorst *et al.* (2010) sur l'acceptabilité de la CMJR auprès d'éleveurs américains pour lesquels ce critère est un concept difficile à comprendre et l'inclusion de l'ingestion en tant que telle dans un index de sélection peut être plus explicite.

À la place d'un critère d'efficacité et pour résoudre les problèmes de compréhension et de risque de relations génétiques non favorables, il serait préférable d'inclure toutes les composantes des modèles de régression, c'est-à-dire l'ingestion, la croissance et le poids métabolique des animaux, dans l'index de sélection racial. Van der Werf (2004) a montré que l'inclusion de tous les caractères qui composent la CMJR dans un index de sélection est mathématiquement équivalente à l'inclusion de la CMJR dans cet index. En outre, la combinaison de la consommation d'aliments et de la production dans un index de sélection peut être plus facile à comprendre par les éleveurs par rapport à la CMJR ou au GMQR.

Toutefois, comme discuté dans l'étude de Berry et Crowley (2012), un des avantages de la CMJR et du GMQR est la faible relation avec le poids des animaux, contrairement à la CMJ et au GMQ. L'inclusion dans un index de sélection de la CMJ et du GMQ, suivant les pondérations données à chacun, peut entraîner des conséquences sur le format des animaux. Un levier pour atténuer les risques potentiels de réponse à la sélection défavorable serait de combiner la CMJR et le GMQR dans un index de sélection de manière similaire au CGR. De plus, les auteurs notent que la forte probabilité d'obtenir des animaux efficaces sur la CMJR mais avec une vitesse de croissance faible n'est pas forcément acceptable par les éleveurs. Il serait donc intéressant de tester les réponses à la sélection de cet index pour juger de la pertinence de ce critère.

■ 3.3. Le phénotypage est essentiel

Pour maintenir une évaluation génétique précise sur l'efficacité alimentaire, il est nécessaire de mesurer l'ingestion

individuelle. Or ce phénotypage coûte cher et n'est à l'heure actuelle pas disponible à grande échelle pour les fermes commerciales. Il est donc essentiel de déterminer une stratégie de phénotypage pour créer une population de référence de taille suffisante, complétée chaque année, afin d'obtenir des valeurs génomiques suffisamment précises. Il est également important de se poser la question de quels animaux phénotyper, à quelle phase de leur vie et avec quel type d'aliment.

a. Avec quels aliments ?

La première question à se poser est de savoir quel aliment utiliser pour nourrir les animaux dont on veut enregistrer l'ingestion. Concernant la voie mâle de notre étude, les corrélations génétiques supérieures à 0,90 pour les GMQR et EA entre les populations des taureaux de CI et des taurillons EFFI-J montrent que la sélection des taureaux de CI alimentés aux DAC avec un aliment condensé serait pertinente pour améliorer génétiquement ces deux critères d'efficacité alimentaire quel que soit le type de régime. En revanche concernant la CMJR, la corrélation génétique estimée de 0,58 suggère qu'une interaction génétique \times environnement semble exister et que, malgré un progrès génétique possible, la sélection des taureaux de CI alimentés aux DAC avec un aliment condensé ne suffit pas pour améliorer efficacement la CMJR des taurillons alimentés avec de l'ensilage. Au sein du dispositif EFFI-J, des mécanismes physiologiques spécifiques aux régimes ensilage d'herbe et ensilage de maïs ont été identifiés (Jorge-Smeding *et al.*, 2021). Il est donc raisonnable de penser que des mécanismes spécifiques au régime des taureaux de CI existent, limitant donc le progrès génétique possible via leur sélection sur l'efficacité alimentaire. Une voie possible pour réduire cette interaction serait de phénotyper l'ingestion de paille des taureaux de CI, jusque-là non réalisée. Mais cela nécessiterait d'investir dans des auges peseuses (une auge pour deux à trois animaux), les DAC n'auraient donc plus d'utilité et la ration pourrait se rapprocher de celles utilisées chez leurs descendants. Une ration à base d'ensilage d'herbe comme celle utilisée dans le

dispositif EFFI-J permettrait d'évaluer génétiquement les animaux avec un aliment se rapprochant des pratiques en ferme tout en rendant possible l'expression du potentiel génétique à des fins d'évaluation. De plus, cette évaluation irait dans le sens souhaité des pratiques d'élevages utilisant moins d'aliments concentrés.

Caractériser finement les interactions G \times E nécessite une forte puissance statistique avec un nombre important d'animaux. Dans notre étude où un des objectifs était de déterminer les relations génétiques entre les animaux nourris avec un aliment complet condensé et de l'ensilage, le manque de puissance du dispositif EFFI-J a été une limite importante. Il faut aussi noter que si ce dispositif EFFI-J utilisait deux types d'ensilage, herbe et maïs, dans l'objectif d'étudier les déterminants nutritionnels de l'efficacité, les effectifs intra régime (environ 320 taurillons) étaient trop faibles pour estimer l'interaction du régime des taurillons sur l'efficacité alimentaire.

b. Avec quels animaux et dans quelles stations ?

La voie mâle

La deuxième question à se poser est de savoir quels animaux on doit phénotyper et à quel moment de leur vie. Les outils de phénotypage doivent optimiser l'expression du potentiel génétique des animaux, sans changement régulier de protocole et avec suffisamment d'individus pour évaluer précisément la série. Les stations CI et SE (stations d'évaluation ayant un protocole similaire au CI sans évaluation de l'efficacité alimentaire) sont actuellement des outils pertinents pour tester le potentiel de croissance des animaux et sélectionner les meilleurs pour la reproduction. Comme mentionné précédemment pour les stations CI, les stations SE peuvent évoluer en les dotant d'outils d'enregistrement de l'ingestion. De plus, ces stations SE permettraient d'incrémenter plus fortement la population de référence pour toutes les races allaitantes à grand effectif : + 647 animaux/an en race Charolaise, + 816 animaux/an en race Limousine et + 211 animaux/an en race Blonde d'Aquitaine (Reffay & Mangeol, 2016). Pour la race Charolaise,

il faudrait environ 3 ans pour doubler la taille de la population de référence actuelle. Cependant, l'investissement dans un outil de phénotypage de l'ingestion dans ces stations représente un investissement financier conséquent.

La voie femelle

Contrairement aux mâles où l'on veut tester leur potentiel de croissance et leurs aptitudes bouchères, les femelles sont testées sur leurs qualités maternelles, à savoir la capacité à se reproduire, à produire un veau et à l'élever correctement. Cela nécessite un pas de temps plus long afin de déterminer le potentiel génétique des femelles. Lorsque la phase de production commence, les femelles engagent moins d'énergie pour la croissance par rapport à l'entretien. Le protocole de contrôle alimentaire des génisses du dispositif PRECAVAL avait pour vocation de se rapprocher de cette phase de vie. En effet, il a été choisi de contrôler l'ingestion des génisses à une période où elles engagent moins d'énergie pour la croissance et avec un fourrage faiblement énergétique (notamment à la ferme expérimentale du Pin-au-Haras).

D'après les résultats obtenus, la sélection des taureaux de CI ne serait pas efficace pour améliorer l'efficacité alimentaire des génisses puisque l'efficacité mesurée sur ces animaux est peu héritable et qu'aucune relation n'a pu être mise en évidence avec l'efficacité des taureaux de CI. Il est clair que, dans nos dispositifs, la mesure de l'efficacité alimentaire ne fait pas intervenir les mêmes mécanismes entre les populations des mâles (taureaux en CI et taurillons à l'engraissement) et la population des génisses. La vitesse de croissance prenait donc une part beaucoup moins importante, en fonction de l'alimentation, dans la régression de l'ingestion, entraînant un R^2 plus faible comparé aux deux populations mâles. De plus, les héritabilités estimées montrent une variabilité génétique plus faible quand on mesure l'efficacité dans une période où la croissance est plus lente. Les relations génétiques, estimées entre les génisses et les taureaux évalués en CI, étaient donc faibles et non significatives, étant donné les faibles effectifs mesurés chez les femelles. Cette étude

semble donc montrer un déterminisme génétique différent suivant le stade physiologique auquel la mesure est réalisée.

Contrairement à l'évaluation génétique des mâles qui est possible dans plusieurs stations, il existe peu de dispositifs génétiques pour les femelles. Les deux seules stations encore en activité sont les stations dites Qualités Maternelles (QM) pour les races Limousine et Blonde d'Aquitaine. Ces stations ont pour vocation de tester 7 à 8 taureaux de CI par an en mesurant les performances d'une vingtaine de leurs filles, de l'âge de 12 mois jusqu'au sevrage de leur premier veau. Une évaluation génétique est réalisée sur leur croissance, leur précocité sexuelle, leur fertilité, les conditions de naissance et l'élevage de leur veau (Taussat *et al.*, 2021). Il pourrait être intéressant d'ajouter dans ces stations des mesures d'ingestion afin d'évaluer l'efficacité alimentaire des femelles lors de la phase d'élevage et de la phase de production. Néanmoins, comme pour les stations CI et SE, l'investissement nécessaire serait conséquent mais constitue l'unique opportunité pour évaluer l'efficacité alimentaire de femelles dans un dispositif génétique.

c. Phénotypage indirect ?

Une approche indirecte consiste à savoir si l'efficacité peut être prédite phénotypiquement à partir de biomarqueurs physiologiques. Une originalité des résultats issus du programme BEEFALIM 2020 est la découverte de potentiels prédicteurs physiologiques (métabolomiques) de l'efficacité alimentaire, directement mesurés sur les animaux du dispositif et détaillés dans l'article de Cantalapiedra-Hijar *et al.* (2023, ce numéro). D'autres biomarqueurs potentiels de l'efficacité alimentaire ont également été mis en évidence dans l'étude de Taussat *et al.* (2020), de manière indirecte en observant les régions du génome statistiquement associées à l'efficacité alimentaire. Ces travaux ont révélé des mécanismes pour certains communs et pour d'autres spécifiques à chacun des trois critères d'efficacité alimentaire. Parmi ces mécanismes, des voies biologiques en lien avec l'apéline, le

glucagon, l'insuline, l'aldostérone, la GnRH et l'hormone thyroïdienne ont été mises en évidence comme possiblement associées à l'efficacité alimentaire. Couplés aux résultats des relations entre les métabolites et l'efficacité alimentaire chez les taurillons du dispositif EFFI-J, une équation de prédiction pourrait alors être élaborée pour prédire le plus précisément possible l'efficacité des animaux. Ce travail va constituer une des suites du programme BEEFALIM 2020 en utilisant une population externe pour valider cette approche.

Cependant les biomarqueurs utilisés devront être obtenus par des techniques non invasives sur les animaux et à moindre coût. Toutefois, ces biomarqueurs constituent une opportunité pour phénotyper des animaux sans recourir à un investissement lourd de mesure de l'ingestion par des auges peseuses. Cet axe de recherche identifié par Phocas *et al.* (2014) constitue également une suite du programme BEEFALIM 2020 où un phénotype indirect de la CMJR sera testé à des fins de sélection pour, à terme, incrémenter plus rapidement la population de référence. Ces tests seront réalisés uniquement en race Charolaise, mais si le concept est validé, les efforts de recherche seront déployés dans les autres races allaitantes pour qu'elles bénéficient également de cette méthode.

Conclusion

L'analyse du déterminisme génétique de l'efficacité alimentaire a montré que les trois critères utilisés (EA, CMJR et GMQR) étaient modérément héritables chez les mâles (h^2 entre 0,10 et 0,26). La sélection du GMQR et de l'EA à partir des mesures réalisées en stations de CI serait plus efficace que celle de la CMJR, pour laquelle une potentielle interaction GxE existerait entre taureaux de CI et taurillons en engraissement. Cependant, des relations génétiques non favorables existent (notamment entre la CMJR et le GMQ) et il serait nécessaire d'utiliser un index combinant les critères d'efficacité ou un index combinant les composantes des

régressions pour résoudre ce problème. Il faudra néanmoins trouver le moyen de pérenniser la collecte des phénotypes notamment de l'ingestion pour développer la sélection génétique de l'EA dans les diverses races allaitantes Françaises.

Références

Belveze, J., Blachon, A., Blestel, S., Brisson, A., Guibier, C., Lecomte, C., Lomelet, B., & Messenger, P. (2012). *Résultats 2010 des élevages BV suivis par Bovins Croissance*. https://idele.fr/inosys-reseaux-elevage/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FspacesStore%2Fb9a8e89d-cf69-4c66-a5dd-91a6c522fdbf&cHash=408b8722dbfdad6cc6a7bc4ed5641127

Berry, D.-P., & Crowley, J.-J. (2012). Residual intake and body weight gain: A new measure of efficiency in growing cattle. *Journal of Animal Science*, 90(1), 109-115. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4245>

Berry, D.-P. & Crowley, J.-J. (2013). CELL BIOLOGY SYMPOSIUM: Genetics of feed efficiency in dairy and beef cattle. *Journal of Animal Science*, 91(4), 1594-1613, <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5862>

Bouquet, A., Fouilloux, M.-N., Renand, G., & Phocas, F. (2010). Genetic parameters for growth, muscularity, feed efficiency and carcass traits of young beef bulls. *Livestock Science*, 129(1-3), 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.12.010>

Cantalapiedra-Hijar, G., Faverdin, P., Friggens, N.-C., & Martin, P. (2021). Efficience Alimentaire : comment mieux la comprendre et en faire un élément de durabilité de l'élevage. *INRAE Productions Animales*, 33(4), 235-248. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.4.4594>

Cantalapiedra-Hijar, G., Martin, C., Andueza, D., Popova, M., Morgavi, D., Ortiz-Chura, A., Graulet, B., Cassar-Malek, I., Bonnet, M., De La Torre, A., Renand, G., Taussat, S., Ortigues-Marty, I., & Nozière, P. (2023). Mécanismes biologiques à l'origine des différences inter-individuelles de l'efficience alimentaire chez le bovin allaitant. In : Martin P., Cantalapiedra-Hijar G., & Baumont R. (Coord.), *Dossier : Efficience alimentaire des bovins allaitants*, *INRAE Productions Animales*, 36(3), 7299. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2023.36.3.7299>.

Chotteau, P., Cotto, G., & Garrigues, B. (1997). 1996 : L'année économique lait & viande bovine : Perspectives 1997. *Le Dossier du GEB filières* (256).

FGE (2016). Référentiel technique du contrôle des taureaux en station d'évaluation SE et CI.

Griffon, L., Boulesteix, P., Delpuch, A., Govignon-Gion, A., Guerrier, J., Leudet, O., Miller, S., Saintilan, R., Venot, E., & Tribout, T. (2017). La sélection génétique des races bovines allaitantes en France : un dispositif et des outils innovants au service des filières viande. *INRA Productions Animales*, 30(2), 107-124. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2017.30.2.2237>

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier APIS-GENE pour le financement du programme BEEFALIM 2020 ainsi que du projet de thèse de Sébastien Taussat.

Ils souhaitent également remercier tout le personnel des fermes expérimentales pour leur implication dans le programme BEEFALIM 2020.

Hoque, M.-A., Arthur, P.-F., Hiramoto, K., & Oikawa, T. (2006). Genetic relationship between different measures of feed efficiency and its component traits in Japanese Black (Wagyu) bulls. *Livestock Science*, 99(2-3), 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2005.06.004>

Inosys Réseau Élevage (2016). *Vaches, Surfaces, Charges... Tout Augmente Sauf Le Revenu*. http://idele.fr/no_cache/recherche/publication/idelesolr/recommends/vaches-surfaces-charges-tout-augmente-sauf-le-revenu.html

Jorge-Smeding, E., Bonnet, M., Renand, G., Taussat, S., Ortigues-Marty, I., & Cantalapiedra-Hijar, G. (2021). Common and diet-specific metabolic pathways underlying residual feed intake in fattening beef cattle. *Scientific Reports*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03678-x>

Kennedy, B.-W., Van Der Werf, J.-H., & Meuwissen, T.-H. (1993). Genetic and Statistical Properties of Residual Feed Intake. *Journal of Animal Science*, 71(12), 3239-3250. <https://doi.org/10.2527/1993.71123239x>

Koch, R.-M., Swiger, L.-A., Chambers, D., & Gregory, K.-E. (1963). Efficiency of Feed Use in Beef Cattle. *Journal of Animal Science*, 22(2), 486-494. <https://doi.org/10.2527/jas1963.222486x>

Lancaster, P.-A., Carstens, G.-E., Crews, D.-H., Welsh, T.-H., Forbes, T.-D.-A., Forrest, D.-W., Tedeschi, L.-O., Randel, R.-D., & Rouquette, F.-M. (2009). Phenotypic and genetic relationships of residual feed intake with performance and ultrasound carcass traits in brangus heifers. *Journal of Animal Science*, 87(12), 3887-3896. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-2041>

Martin, P., Taussat, S., Vinet, A., Krauss, D., Maupetit, D., & Renand, G. (2019). Genetic parameters and genome-wide association study regarding feed efficiency and slaughter traits in Charolais cows. *Journal of Animal Science*, 97(9), 3684-3698. <https://doi.org/10.1093/jas/skz240>

Martin, P., Taussat, S., Vinet, A., Launay, F., Dozias, D., Maupetit, D., Villalba, D., Friggens, N. C., & Renand, G. (2023). Précocité, efficience et résilience des femelles allaitantes. In : Martin P., Cantalapiedra-Hijar G., & Baumont R. (Coord.), *Dossier : Efficience alimentaire des bovins allaitants*, *INRAE Productions Animales*, 36(3), 7300. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2023.36.3.7300>

Mazars, F., Lapostolle, L., Oden, D., Lecomte, C., & Dimon, P. (2022). *Résultats 2021 des élevages BV suivis par Bovins Croissance*. https://idele.fr/inosys-reseaux-elevage/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FspacesStore%2Fb5f8aa94-8cfb-4418-a306-877e059d9c49&cHash=72fbb1981e104c0aa1c5aa1072fdc0dc

Meyer, K. (2007). WOMBAT: a tool for mixed model analyses in quantitative genetics by restricted maximum likelihood (REML). *Journal of Zhejiang University. Science. B*, 8(11), 815-821. <https://doi.org/10.1631/jzus.2007.B0815>

Mulder, H.-A., Veerkamp, R.-F., Ducro, B.-J., van Arendonk, J.-A.-M., & Bijma, P. (2006). Optimization of dairy cattle breeding programs for different environments with genotype by environment interaction. *Journal of Dairy Science*, 89(5), 1740-1752. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72242-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72242-1)

Nkrumah, J.-D., Basarab, J.-A., Wang, Z., Li, C., Price, M.-A., Okine, E.-K., Crews, D.-H., & Moore S.-S. (2007). Genetic and phenotypic relationships of feed intake and measures of efficiency with growth and carcass merit of beef cattle. *Journal of Animal Science*, 85(10), 2711-2720. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-767>

Phocas, F., Agabriel, J., Dupont-Nivet, M., Geurden, J., Médale, F., Mignon-Grasteau, S., Gilbert, H., & Dourmad, J. (2014). Le phénotypage de l'efficience alimentaire et de ses composantes, une nécessité pour accroître l'efficience des productions animales. *INRAE Productions Animales*, 27(3), 235-248. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2014.27.3.3070>

Reffay, M., & Mangeol, A. (2016). *Évaluation des stations de reproducteurs des secteurs bovins et ovins allaitants*. https://agriculture.gouv.fr/sites/default/files/cgaer_15077_2016_rapport.pdf (consulté le 28/04/2023)

Taussat, S., Saintilan, R., Krauss, D., Maupetit, D., Fouilloux, M.-N., & Renand, G. (2019). Relationship between feed efficiency and slaughter traits of french charolais bulls. *Journal of Animal Science*, 97(6), 2308-2319. <https://doi.org/10.1093/jas/skz108>

Taussat, S., Boussaha, M., Ramayo-Caldas, Y., Martin, P., Venot, E., Cantalapiedra-Hijar, G., Hozé, C., Fritz, S., & Renand, G. (2020). Gene networks for three feed efficiency criteria reveal shared and specific biological processes. *Genetics Selection Evolution*, 52(67). <https://doi.org/10.1186/s12711-020-00585-z>

Taussat, S., Govignon-Gion, A., Izard, L., Stamane, S., Michenet, A., Martin, P., & Fritz, S. (2021). *Genetic parameters of maternal traits recorded in beef cattle progeny test stations*. 72nd. Annual Meeting of the European Federation of Animal Science, Davos, p. 445.

Taussat, S., Fossaert, C., Cantalapiedra-Hijar, G., Griffon, L., Martin, P., & Renand, G. (2023). Paramètres génétiques de l'efficience alimentaire et faisabilité d'une sélection en population bovine

allaitante. In : Martin P., Cantalapiedra-Hijar G., & Baumont R. (Coord.), *Dossier : Efficience alimentaire des bovins allaitants*, INRAE Productions Animales, 36(3), 7330. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2023.36.3.7330>

Van der Werf, J.-H.-J. (2004). Is it useful to define residual feed intake as a trait in animal breeding programs?. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 44(5), 405-409. <https://doi.org/10.1071/ea02105>

Wulfhorst, J.-D., Ahola, J., Kane, S., Keenan, L., & Hill, R. (2010). Factors affecting beef cattle producer perspectives on feed efficiency. *Journal of Animal Science*, 88(11), 3749-3758. <https://doi.org/10.2527/jas.2010-2907>

Résumé

La sélection génétique de l'efficience alimentaire est un outil pour améliorer la rentabilité des élevages allaitants. Une évaluation génétique de ce caractère était réalisée en station de Contrôle Individuel (CI) avec un aliment complet condensé. L'objectif de cette étude est de vérifier si cette sélection est pertinente pour améliorer l'efficience alimentaire quand les animaux en croissance sont alimentés avec des rations à base de fourrages ou de concentrés. Pour cela, des taurillons nourris à l'ensilage ($n = 639$) et des femelles nourries avec du fourrage ($n = 569$) ont été utilisés ainsi que la population de taureaux CI Charolais ($n = 4675$). Trois critères d'efficience alimentaire ont été utilisés : la Consommation Moyenne Journalière Résiduelle (CMJR), le Gain Moyen Quotidien Résiduel (GMQR) et le ratio d'Efficience Alimentaire (EA). Des paramètres génétiques ont été estimés et ont montré que les trois critères utilisés étaient modérément héréditaires chez les mâles (de 0,10 à 0,26) et faiblement chez les femelles (de 0 à 0,13). Concernant la voie mâle, une interaction génotype x milieu sur la CMJR semble exister (corrélation génétique de $0,58 \pm 0,37$ entre les taureaux de CI et les taurillons), qui pourrait donc entraîner un progrès génétique plus faible lors de la sélection de ce caractère. Il serait donc pertinent de phénotyper à partir de rations à base de fourrages pour diminuer cette interaction. Concernant les génisses, le faible nombre d'animaux ainsi que l'utilisation de deux rations contrastées ont limité la précision des estimations (corrélation génétique de $0,50 \pm 0,48$ avec les taureaux de CI). Le phénotypage direct ou indirect de l'efficience alimentaire est l'élément clé afin de pérenniser l'évaluation.

Abstract

Genetic parameters of feed efficiency and feasibility of selection in Charolais cattle population

Genetic selection for feed efficiency is a tool to improve the profitability of beef cattle farms. Until now, a genetic evaluation of this trait was carried out in performance test stations using a complete pelleted diet, which is not widely used on farms. The objective of this study is to confirm if this selection is relevant to improve feed efficiency trait of animals which fed forage or concentrate diet. For this purpose, young bulls fed silage ($n = 639$) and heifers fed forage ($n = 569$) were used as well as the Charolais bulls tested on performance stations ($n = 4675$). Three feed efficiency criteria were used: Residual Feed Intake (RFI), Residual Gain (RG) and Feed Conversion Efficiency (FCE). Genetic parameters were estimated and showed that the three feed efficiency criteria was moderately heritable for both bull populations (from 0.10 to 0.26), low for heifers (from 0 to 0.13). Concerning both bull populations, genotype x environment interaction would exist ($0,58 \pm 0,37$ performance tested bulls and young bulls) and thus, genetic progress would be lower concerning the selection of this trait. Phenotyping on forage-based diets would therefore be an effective way to reduce this interaction. For heifers, the small number of animals and the use of two different diets have limited the accuracy of the estimates (0.50 ± 0.48 with performance tested bulls). Direct or indirect phenotyping of feed efficiency is the key element to make the evaluation sustainable.

TAUSSAT, S., FOSSAERT, C., CANTALAPIEDRA-HIJAR, G., GRIFFON, L., MARTIN, P., & RENAND, G. (2023). Paramètres génétiques de l'efficience alimentaire et faisabilité d'une sélection en population bovine Charolaise. In : Martin P., Cantalapiedra-Hijar G., & Baumont R. (Coord.), *Dossier : Efficience alimentaire des bovins allaitants*, INRAE Productions Animales, 36(3), 7330. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2023.36.3.7330>



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

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

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