



HAL
open science

Etude de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire de la vache laitière

Amélie Fischer

► **To cite this version:**

Amélie Fischer. Etude de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire de la vache laitière. Zootechnie. Agrocampus Ouest, 2017. Français. NNT : 2017NSARB296 . tel-01697844

HAL Id: tel-01697844

<https://theses.hal.science/tel-01697844v1>

Submitted on 31 Jan 2018

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.

UNIVERSITE

BRETAGNE

LOIRE

AGRO
CAMPUS

OUEST

Amélie FISCHER • 12 avril 2017

Thèse AGROCAMPUS OUEST
sous le label de l'Université européenne de Bretagne
pour obtenir le grade de
DOCTEUR D'AGROCAMPUS OUEST
Spécialité Biologie et Agronomie

ÉCOLE DOCTORALE • Vie - Agro - Santé (VAS)
LABORATOIRE D'ACCUEIL • UMR INRA / AGROCAMPUS OUEST
Physiologie, environnement et génétique pour l'animal et les
systèmes d'élevage (PEGASE)

Étude de la variabilité interindividuelle de l'efficience alimentaire de la vache laitière

Sandrine LAGARRIGUE
Professeure, AGROCAMPUS OUEST, UMR INRA-AO PEGASE /
présidente

Hélène GILBERT
Chargée de recherche, INRA UMR GenPhyse / *rapporteuse*

Didier BOICHARD
Directeur de recherche, INRA UMR GABI / *rapporteur*

Michel WATTIAUX
Professeur, Université de Wisconsin-Madison / *rapporteur*

Christine GÉRARD
Manager R&D ruminants, Néovia / *examinatrice*

Philippe FAVERDIN
Directeur de recherche, UMR INRA-AO PEGASE /
directeur de thèse

.....
Marie-Pierre JACQUEROUD
Cheffe de service, institut de l'élevage / *invitée*

Remerciements

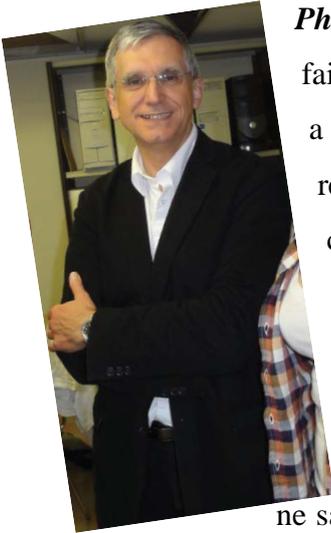
Je me souviens il y a 4 ans de cela, Philippe Faverdin, mon maître de stage à l'époque, me demandait si j'étais intéressée pour poursuivre en recherche et notamment en thèse. Je me souviens lui avoir répondu : « [...] je ne poursuivrai jamais en recherche, je veux travailler sur le terrain [...] ». Ironie du sort, me voilà 4 ans plus tard, épanouie et docteure. Comme quoi on ne le répétera jamais assez : « il ne faut jamais dire jamais » (Napoléon III). Ma condition sine qua none était surtout de faire une thèse pour réaliser un projet de recherche avec une finalité appliquée et sur un sujet porteur, j'ai donc choisi de travailler sur l'efficience alimentaire de la vache laitière. Je me suis donc lancée dans ce projet de recherche en thèse Cifre entre l'Institut de l'élevage, l'INRA et l'école doctorale VAS de Rennes.

Me voilà partie pour 3 ans de recherche : on commence tous de la même manière, à se dire que 3 ans c'est long, il y a le temps... Au final, une fois que la machine est lancée, on perd un peu la notion du temps qui passe. Après tout « *Quand vous vivez totalement chaque instant, sans rien attendre, vous n'avez aucune idée du temps.* » (Shunryu Suzuki). Ces 3 ans passés à vos côtés, je les ai appréciés à fond et je tenais vraiment à tous vous remercier pour la générosité et le partage que vous m'avez offerts.

Au final après 3 ans, en général les gens se souviennent du sujet de thèse, des nombreuses expérimentations et surtout des mesures et analyses demandées, et peut-être du nom du doctorant. Si la thèse ne se résumait qu'au sujet et au doctorant, 3 ans seraient loin d'être suffisants, une carrière serait sans doute nécessaire pour tout réaliser. Pour qu'une thèse et plus particulièrement cette thèse Cifre puisse aboutir, il a fallu rassembler l'ensemble des partenaires du projet Cifre : Institut de l'élevage, INRA, école doctorale et doctorant. Merci à Philippe Faverdin, Marie-Pierre Jacqueroud et André Le Gall pour avoir initié et été les moteurs de ce projet de thèse Cifre. A cet effet, je tenais à remercier l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) pour avoir validé et financé cette thèse Cifre. L'ouverture permise par ce dispositif, notamment en travaillant à la fois dans un laboratoire de recherche publique et dans une entreprise, fut l'atout majeur du projet et la principale motivation à mes yeux pour me lancer dans une thèse.

Une thèse c'est aussi **équipe gagnante...**

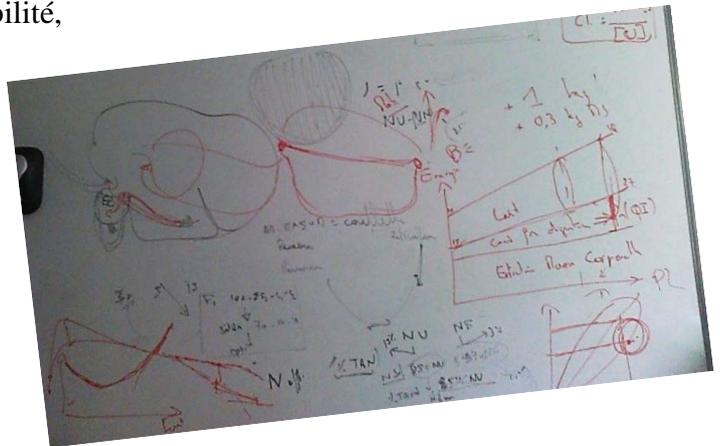
Le secret d'une thèse réussie est aussi et surtout le **bon fonctionnement entre le doctorant et ses encadrants**. Avoir le soutien de ses encadrants est essentiel dans une thèse. A cet effet, je tenais profondément à remercier Philippe Faverdin, Marie-Pierre Jacqueroud et Julien Jurquet pour m'avoir soutenue dans mes démarches du début à la fin du projet de thèse et même dans mes projets d'après-thèse. Ce soutien est très bénéfique et a permis de prendre davantage confiance en moi.



Philippe, tu m'as connue étudiante, comme quelqu'un qui ne voulait pas faire de la recherche et qui comme tu l'as expliqué le jour de la soutenance a fait du chemin depuis, un chemin qui s'oriente de plus en plus vers la recherche. Je tenais à te remercier, notamment pour n'avoir pas insisté à ce que je fasse de la recherche et pour avoir attendu que j'y vienne par moi-même. Tu m'as laissé une grande liberté pendant ces 3 ans et m'as offert cette occasion inédite de découvrir réellement ce qu'était la recherche, au-delà de ce qu'on nous enseigne. Merci à toi pour l'ensemble de ton encadrement sur le plan purement scientifique : je ne saurai comment résumer en quelques lignes tout ce que tu m'as enseigné (ou du moins essayé de m'enseigner). S'engager dans une discussion avec toi Philippe est intimidant au début, surtout quand on sait que tu es un chercheur de renommée mondiale et que tu es le 'papa' des taux de substitution : forcément je me suis sentie toute petite lors de notre premier entretien. Mais au fil des années, j'ai surtout compris et apprécié ta modestie, pédagogie et ta capacité à te « mettre à mon niveau ». Je ne suis pas sûre d'avoir retenu tout ce que tu m'as enseigné pendant ces 3 ans sur le plan purement des connaissances scientifiques mais j'ai retenu l'essentiel : il faut rester curieuse pour entretenir ses connaissances et l'art de la communication est l'art de la répétition. Je retiens surtout des termes qui jusqu'alors m'étaient inconnus et que je ne pense pas oublier de sitôt : « il fait beau et ma sœur du vélo » = un zeugma, la polydipsie, l'hétéroscédasticité, la comminution (non non, il n'y a pas de faute, je ne parle pas de communion), « être de guingois » ou encore le fameux syndicat d'initiatives (plus connu sous le nom d'office du tourisme). Merci aussi pour l'ensemble des discussions que nous avons partagées, la plupart commençant avec un objectif précis en lien avec la thèse mais finissant souvent bien loin des objectifs fixés ☺, voire même philosophiques. Au final, je sortais toujours du bureau avec les réponses à mes questions mais aussi avec de nouvelles questions ou des « et cette équation ça donne quoi ? » ou bien « et ce

graphe là ça donne quoi ? », je retiendrai l'importance des graphiques pour bien cerner ses données ☺. Merci pour tous ces moments partagés dans le cadre du travail et en dehors, autour d'un bon repas ou d'une pédale ou en prenant l'R. Merci pour la confiance que tu as eue très rapidement en moi et ta disponibilité,

même si elle n'était pas « physique » tout le temps. Je repars avec une valise bien pleine et en souvenirs j'ai mis un des tableaux que nous avons dressé durant nos discussions : c'est celui que tu m'as fait pour m'expliquer l'anatomie digestive chez les ruminants et la digestion.



Marie-Pierre, je me suis tout de suite sentie à l'aise à travailler avec toi. Tout à commencer avec le CDD avant la thèse et j'espère que tout ne va pas se terminer avec le CDD post-thèse. Je souhaitais particulièrement te remercier pour ta qualité d'encadrante mais surtout de chef de service. On critique trop souvent le travail, et au final on remercie très peu. A cet effet, merci pour ce travail énorme que tu as fait et que tu fais au quotidien pour valoriser ton service et tes collègues. Je me suis vraiment sentie comme un membre du service Productions Laitières, au titre de collègue de travail et non simplement comme « étudiante ». Merci pour ce respect et cette justesse dont tu fais preuve pour soutenir et défendre ton service. C'était je pense une condition importante pour que je me sente vraiment intégrée dans le service. Merci pour le soutien que tu m'as apporté au quotidien et surtout dans les moments décisifs de la thèse, que ça soit pour m'inciter à communiquer mais aussi pour m'inciter à lever le pied de temps. Pour illustrer ces 3,5 ans passés ensemble, j'ai mis deux photos qui reflètent bien ce que tu as été à mes yeux : une chef sérieuse et juste mais aussi une personne de bonne humeur en permanence.

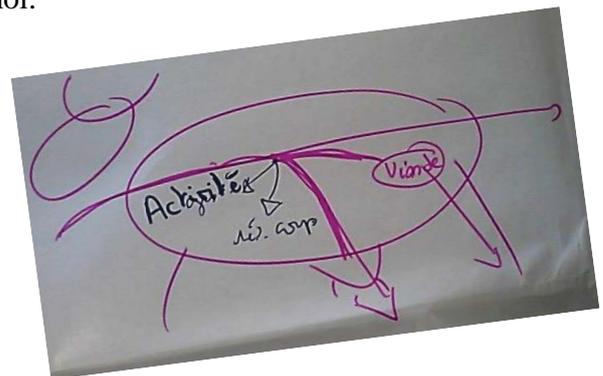




Julien, quand je repense « à notre première fois », ça me fait toujours rire. Quand Marie-Pierre m'a dit que je serai encadrée par quelqu'un qui n'était pas encore recruté et qui ne connaissait pas grand-chose à l'efficacité, je me suis dit « en d'autres termes, j'ai quelques mois de plus que lui (= toi) en termes de connaissances sur l'efficacité alimentaire et vais devoir le former en même temps que moi ». Ça pouvait être vu comme un sacré challenge... Je me souviens des yeux que tu as fait après notre première réunion qui devait te présenter les bases de l'efficacité alimentaire et du projet de thèse. Au final, on en a fait du chemin ensemble tous les

deux ! Si bien qu'on est arrivé à notre objectif qui était qu'à la fin de la thèse tu maîtrises le concept et puisses me remplacer (même si avec le service com' de l'Institut de l'élevage on a même évoqué comment te faire passer pour moi, avec perruque, rasage de la barbe [...], je te rassure, je ne te forcerai pas à céder, d'autant plus qu'il faudrait te repeindre en blanc...). Merci pour toutes les discussions qu'on a eues ensemble, notamment pour vulgariser et rendre les messages plus clairs. Tu as dû te familiariser avec les attentes d'un projet de recherche complexe et tu l'as fait aisément. Je t'en remercie et surtout je te remercie de ton soutien permanent aux Trinottières. J'ai beaucoup apprécié travailler avec toi et te remercie pour ta patience, ton calme et ton soucis de vulgarisation « pas dans l'excès ». Comme souvenir de ces 3 ans, j'ai mis 2 photos ou plutôt 2 dessins (comme l'a subtilement suggéré notre collègue Marie du service com', 2 dessins de « Lascaux », qualificatif qui décrit bien notre compétence artistique à Julien et moi.

Loin de nous la volonté de nous comparer à l'art des grottes de Lascaux) que nous avons produits ensemble pour synthétiser les résultats de la thèse. Bien sûr il ne s'agit là que de croquis et non du résultat final.



Une thèse avec des encadrants mais aussi et surtout des **équipes de recherche** qui m'ont vue grandir et m'ont aidée à apprivoiser la recherche et son transfert dans la filière. J'aimerais à cet effet remercier les 2 collectifs qui m'ont accueillie comme une jeune collègue et pas seulement comme étudiante : l'équipe **Syslait (=systèmes laitiers)** de l'UMR PEGASE et le **service productions laitières de l'Institut de l'élevage**.

Je vous remercie toutes et tous pour l'accueil que vous m'avez offert, la bonne humeur et toutes les discussions que nous avons partagées, que ce soit sur ce fameux RFI (= non Luc, ce n'est pas Radio France Internationale mais bien Residual Feed Intake) ou sur d'autres sujets. J'aurais espéré prolonger ces moments mais je me suis dit que vous saturiez sans doute un peu à force d'entendre parler de RFI et d'efficience. Merci pour tous ces bons moments passés tous ensemble à travailler ou comme on dit à entretenir son réseau professionnel lors des voyages d'études ou de sorties.

Merci à : *Rémy Delagarde, Christine Baratte, Luc Delaby, Catherine Disenhaus, Nadège Edouard, Philippe Faverdin, Anne-Isabelle Graux, Anne-Lise Jacquot, Yannick Le Cozler, Nicolas Bédère, Florence Dufreneix, Alexia Charpentier, Rémi Resmond, Yvane Robic, Laurent Dumercy, Aymeric Charrier, Marcolino, Tiago, Katarzina,* pour l'équipe Syslait.



Merci à : *Marie-Pierre Jacqueroūd, Jocelyne Beaulieu, Fabrice Bidan, Valérie Brocard, Dominique Caillaud, Jérôme Chandler, Audrey Chanvallon, Marine Gelé, Jérémie Jost, Julien Jurquet, Monique Laurent, Yves Lefrileux, Jean Legarto, Jean-Louis Poulet, Benoît Rouillé, Elise Vanbergue* du service Productions Laitières.



Je souhaiterais faire un clin petit clin d'œil à celui qui m'a suivie depuis mon arrivée dans cette contrée qui m'était inconnue, la Bretagne. Celui qui a su m'orienter du classique « je voulais faire vétérinaire mais n'ayant pas été admise, j'ai choisi Agrocampus-Ouest » (année 2010-11) à « je cherche des passerelles pour rejoindre la formation vétérinaire mais vais finir mes 3 ans à l'école d'ingénieurs » à « je vais tester un stage en recherche pour voir... » (année 2011) en passant par « c'est sûr je ne ferai jamais de la recherche » (issu du stage 2011-12) et pour finir à « je me lance dans un stage en recherche... mais pas pour faire une thèse derrière... » (année 2013). Au final, je suis bien partie pour m'épanouir dans la recherche.



Merci pour tous les conseils que tu m'as prodigués pendant toutes ces années et de m'avoir orientée vers ce stage de fin d'études de mathématiques appliquées à l'élevage. Si je n'avais qu'une chose à retenir de nos années passées ensemble ce serait de profiter de chaque instant et de saisir une opportunité quand elle se présente, il n'y pas qu'une seule voie possible ☺. Au cas où tu ne te serais pas encore reconnu, *merci à toi Yannick Le Cozler*. J'étais un peu perdue en arrivant et ai pris du temps à me trouver mais ça y est, je sais ce que j'ai envie de faire : « m'éclater dans ce que j'entreprends, que ce soit dans la recherche ou ailleurs ».

On a beau citer tous les appuis scientifiques dont on bénéficie dans le cadre de la thèse, mais je crois que rien n'aurait été possible sans



l'investissement et la motivation de mes collègues qui travaillent au laboratoire



de St-Gilles, à la **ferme expérimentale de la Chambre d'agriculture 49 Les Trinottières** et à l'**installation expérimentale UMR PEGASE de Méjusseume**.

Les essais que nous avons mis en place sur les deux fermes étaient colossaux, non pas pour le nombre de mesures à réaliser par semaine mais surtout par l'effectif à suivre et par la durée de l'essai (10 mois). La mise en place a été longue et a nécessité un temps d'adaptation des équipes des 2 stations expérimentales mais on y est arrivé, tous ensemble. Merci à l'équipe des Trinottières qui malgré leur faible effectif en

personnel ont su s'adapter et assurer un suivi de qualité de l'essai. Je me souviens des premières réactions lors de la présentation des essais à Méjusseaume : « mais on ne va pas laisser les vaches en bâtiment toute la lactation durant ! Nous avons l'habitude de les sortir au printemps... » ou encore la volonté de bien faire aux Trinottières, notamment en termes de métrologie du matériel utilisé. Le suivi de ces essais long terme s'est au final très bien passé. Bien sûr il y a eu des imprévus mais vous avez su vous adapter rapidement. L'utilisation de tant de capteurs embarqués sur une même vache semblait simple et gagné d'avance mais au final ce n'était pas si simple ! Ceux qui aujourd'hui croient encore que automatique = autonome sont bien loin de la réalité. Et oui, nous avons découvert que l'automatique, encore plus que ce qui est fait manuellement, nécessitait des contrôles réguliers. A cet effet, je tenais à remercier les 2 équipes qui ont su s'adapter et s'investir dans la métrologie des appareils « automatiques ». Une illustration de cette adaptabilité qui me revient régulièrement en tête est la mise en place aux Trinottières d'un protocole pour tester régulièrement le fonctionnement de la balance des vaches : à défaut de pouvoir accéder à la balance aisément avec des masses étalons, Denis a proposé de peser l'équipe des Trinottières (je soupçonne qu'il y ait un enjeu plus subtile derrière cette proposition). Beaucoup de discussions et de questions sur la métrologie et le suivi des appareils automatiques ont émergé grâce à ces 2 essais. De nombreuses mesures se sont rajoutées au protocole initial, notamment à Méjusseaume. Je tenais particulièrement à remercier l'ensemble de l'équipe de Méjusseaume pour avoir su s'adapter pour satisfaire un maximum les demandes et cela malgré la réduction des forces humaines : que ça soit pour assurer les acquisitions en 3D bihebdomadaire (*Françoise, Gaëlle, David et Michel F.*), les semaines de digestibilité sur les 60-75 vaches (*un peu tout le monde en fait* car pour prélever des fèces puis les répartir dans des barquettes avant de les enfourner et de les mixer : il en faut du temps et des personnes), les séances portrait des vaches en infra-rouge (*Mathieu, Françoise et Joseph*) et les prélèvements de jus de rumen et de salive (là aussi *un peu tout le monde* car c'est toute une organisation aussi bien à l'étable qu'au laboratoire !). Autant de mesures réalisées qui ont mobilisé beaucoup de personnes. Je tenais aussi à remercier *Thibaud Le Mouël* pour qui les bouchons ytterbium et les AGU n'ont plus de secrets. Merci Thibaud d'avoir



partagé la mise en « bouchon » (et non pas en bouteille) de l'ytterbium. J'avoue que j'en ai rêvés de nos 2 jours de mise en bouchon en non-stop... Merci aussi à vous tous et à tous les stagiaires qui ont également contribué à ces mesures ! Un grand merci à **Jean-Michel Lamy et Michel Prézelin des Trinottières et à Ginette Théaud de Méjusseume** pour leur travail et disponibilité pour discuter de la mise en forme des données : c'est un travail colossal qui m'a fait gagner pas mal de temps ! Un grand merci à vous tous pour votre rigueur dans votre travail, et oui car pour pouvoir isoler une efficacité qui s'élève à 0,8 UFL/j/vache,



je vous assure que c'est surtout grâce à la qualité de votre travail. Un petit clin d'œil particulier pour **Michel Fargetton** qui m'a dédié pas mal de son temps pour m'expliquer toutes les méthodes employées à Méjusseume dans les moindres détails, merci pour ton souci du détail que j'ai bien apprécié et pour ton sens de

l'humour.

Au final merci à : **Jacques, André, Antoine, Arnaud, Philippe, Bernadette, Daniel, David, Eric, Françoise, François, Gaëlle, Gaël, Ginette, Jean, Jean-Luc, Jean-Yves, Jérémy, Joseph, Maryvonne, Mathieu, Michel, Michel F., Patrick et Thibaud** pour Méjusseume et l'UMR PEGASE.



Et merci à **Jean-Michel, Michel, Adrien, Anthony, Benoît, Camille, David, Denis, René et Joël** pour l'équipe des Trinottières.



Merci aussi à l'accueil que vous m'avez donné au sein des *collectifs de l'UMR PEGASE et du site Idele du Rheu.*

Merci pour votre bonne humeur constante et surtout l'esprit du collectif : je me suis vraiment sentie chez vous comme dans une deuxième famille. Bien que ces 2 collectifs se distinguent de par leur taille, aussi bien en effectif qu'en bâtiment, je me suis sentie à l'aise dans les deux. Je ne sais pas combien de fois je me suis perdue dans le bâtiment de PEGASE... Quand on ne connaît pas, on a du mal à trouver les repères, mais une fois qu'on a compris qu'il s'agissait d'un carré, on comprend vite qu'en faisant le tour on est censé retomber sur ses pas...

A l'inverse au Rheu à l'Institut de l'élevage, j'ai très vite trouvé mes repères. La diversité des compétences présentes à la fois à l'UMR PEGASE et à l'Institut de l'élevage du Rheu a vraiment été une richesse incontestable de thèse. Merci à vous tous pour votre ouverture et votre disponibilité, mais aussi pour les événements festifs, importants pour «entretenir son réseau professionnel» : le cochon grillé, la journée des doctorants, les QuiCaféQuoi ?, les repas de fin d'années (mes préférés vu que c'est pour fêter Noël), les galettes des rois, les partages culinaires, le repas d'été. Merci pour tous ces souvenirs !



cette

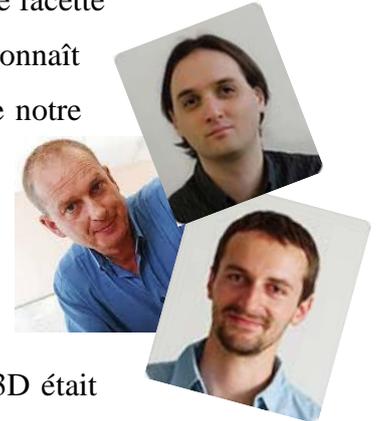
pour discuter,



Arrivée là on se dit que ça doit sentir la fin mais non, il reste des gens importants qui ont contribué à la thèse, sans lesquels la thèse n'aurait pas été ce qu'elle est : ***l'ensemble des partenaires et collaborateurs.***

La thèse n'aurait pu aboutir à ce résultat si les collaborateurs n'avaient pas été aussi investis. Je tiens donc à remercier les uns après les autres l'ensemble des collaborateurs et partenaires :

Mon premier partenaire qui était **3DOuest** et m'a fait découvrir une facette de la recherche privée que je ne connaissais pas avant. On se connaît maintenant depuis 4 ans et j'avoue que j'ai du mal à m'imaginer que notre expérience commune se termine. Merci à vous, ***Jean-Michel, Laurent et Thibault*** pour avoir été patients et surtout m'avoir transmis votre passion. J'ai beaucoup appris de nos échanges, surtout en matière de communication. Merci pour tout ce temps que vous m'avez consacré pour expliquer les choses à mon niveau. Le projet 3D était ambitieux mais on a réussi à bien le booster. Les quelques imprévus seront réglés assez rapidement, j'ai confiance. Pour cela, je voulais vous remercier pour votre implication, disponibilité et bonne humeur récurrente tout au long de ma thèse. Ce fut une très agréable première expérience partenariale qui me motive à poursuivre dans cette direction.



La thèse a nécessité de nombreux capteurs embarqués, notamment pour mesurer l'activité et la température ruminale de la vache. A cet effet, je tenais sincèrement à remercier l'ensemble de l'équipe de **Médria** et plus particulièrement ***Jean-Pierre Lemonnier, Elsa Leyrat-Bousquet, Cédric Riou et Sébastien Prodhomme*** avec qui j'ai eu l'occasion de travailler. Cet univers des automates et capteurs étaient une nouveauté pour moi. Notre collaboration ne nécessitait pas un échange poussé sur le fonctionnement des capteurs et la génération des données, et pourtant vous avez tous pris de votre temps pour m'expliquer. A cet effet je vous remercie pour votre disponibilité tout au long des essais, permettant ainsi le bon déroulement des essais. Jean-Pierre Lemonnier, je voulais aussi te remercier pour ces discussions riches que nous avons eues et notamment pour avoir partagé avec moi ton expérience de création d'entreprise.



Je tenais aussi à remercier **Donagh Berry** du **Teagasc**, qui m'a accueillie dans son laboratoire en Irlande pour discuter 'modèle mixte'. Ça n'a pas été simple tous les jours, notamment pour se comprendre et m'a permis de réaliser qu'effectivement les généticiens et zootechniciens ne parlaient pas toujours la même langue. Il ne s'agissait pas seulement d'un problème de langue natale (bien que nos accents respectifs n'étaient pas toujours compréhensibles par l'autre) mais bien d'une différence de raisonnement. Grâce à cette collaboration j'ai compris qu'il existait des codes dans le monde de la recherche et que ces codes dépendaient beaucoup de la spécialité choisie, mais aussi du pays. Je ne réalisais pas l'importance de ces codes en recherche, et donc l'importance du choix des mots dans les communications et notamment les communications écrites. Merci à toi Donagh pour cette expérience.



J'ai pendant la thèse eu l'occasion de discuter avec de nombreuses personnes, de différents profils, notamment grâce aux colloques auxquels j'ai participé. Au début, j'étais un peu timide et n'osais pas aborder directement les gens pour discuter avec eux. En participant à un concours à l'EAAP, j'ai compris que pour avancer, il ne faut pas hésiter à se lancer. Grâce à cette expérience, j'ai fait la connaissance de nombreuses personnalités, en commençant par Marija Klopčič et Abele Kuipers que j'ai rencontré à l'EAAP comme jury du concours auquel je participais et avec qui j'ai régulièrement des discussions. Grâce au prix remporté à ce concours, j'ai fait beaucoup de rencontres, notamment aux USA en visitant Novus International dans le Missouri à St-Louis et au colloque de l'ADSA à Orlando. Merci à Novus International de m'avoir accueillie et de m'avoir ouvert ses portes pour m'exposer sa vision de la R&D. Merci aussi à Martin Lidauer et Peter Lovendahl que j'ai rencontrés à l'EAAP en 2016 et avec qui nous avons intensément discuté d'efficience alimentaire mais aussi de post-doc.

J'en viens maintenant à remercier une personne qui m'a beaucoup touchée, car comme Yannick, Philippe et Marie-Pierre, tu as su me parler, m'écouter et me conseiller. Nic Friggens c'est de toi qu'il s'agit : je tenais vraiment à te remercier pour ces 3 ans. Que ça soit les échanges autour de la thèse ou professionnels hors thèse ou même les moments non professionnels autour d'un repas, merci pour toutes ces discussions et ces moments. Tu m'excuseras mais malgré les 3 ans passés ensemble, je n'ai même pas trouvé de photo.



Que serait une thèse sans la validation du travail de thèse ? Sans doute une très bonne expérience mais ce serait comparable à un roman sans fin.

A cet effet, je tiens à remercier les membres du comité de thèse : **Philippe Faverdin, Marie-Pierre Jacqueroud, Julien Jurquet, Nicolas Friggens, Florence Phocas, Lucile Montagne et Nathalie Quiniou**, pour m'avoir suivi tout au long de ma thèse.



Merci pour ces débats intenses et intéressants durant les comités et surtout merci pour les mises en garde face à la charge de travail prévue : vous aviez raison, il y avait beaucoup à faire ! C'était un beau challenge.

Au final pour que le roman se finisse bien et ait une fin, je remercie sincèrement l'ensemble des membres du jury qui ont accepté de s'atteler à la lourde tâche d'évaluation de ce travail de



thèse. **Merci à mes rapporteurs Didier Boichard, Hélène Gilbert et Michel Wattiaux**, à mon examinatrice **Christine Gérard et à**

Sandrine Lagarrigue qui représentait l'école doctorale VAS. Merci à vous 5 pour votre disponibilité et votre présence le jour J. Je tenais particulièrement à vous remercier pour l'échange que nous avons eu le 12 avril, que j'ai plutôt vu comme un échange entre collègues que comme un échange entre professionnel et étudiant. J'espère que vous aurez apprécié ce moment de partage tout autant que moi.

Pour finir, une thèse c'est aussi une vie en dehors du boulot, contrairement à ce que beaucoup disent, la thèse ce n'est pas 3 ans de vie personnelle 'mise en standby', au contraire ce sont 3 ans d'épanouissement personnel. Et oui c'est possible ! Le tout est de se prendre le temps qu'il faut pour faire autre chose. Merci à tous mes amis, que ce soit les **doctorants** que j'ai côtoyés, et surtout les personnes qui ont dû me supporter à longueur de journée dans le bureau (**Paulo Campos, Hélène Romé, Florence Dufreneix, Laurence Buonocore,**



Alexia Charpentier, Yvane Robic et Rémi Resmond et parfois Nicolas Bédère). Merci pour ces « pêtages » de câble et ces moments de détente tout au long de la thèse : bowling, sortie à cheval, soirée entre amis, randonnées, cinéma, restaurant. Merci aussi à *tous mes amis hors contexte professionnel* qui étaient présents régulièrement.

Pour finir je souhaite faire un grand clin d'œil à ceux qui m'ont donné le goût et la passion de la nature et de l'élevage ; ceux qui étaient là depuis le 1^{er} jour et qui m'ont poussée à dépasser mes limites et à persévérer ; ceux qui m'ont appris l'importance des relations humaines et que pour réussir c'est une question de volonté c'est sûr mais c'est surtout avec les autres qu'on réussit. Si vous ne vous êtes pas reconnu, c'est à vous que je m'adresse, *maman, papa, papi et mamie, ainsi qu'Olivier et Guillaume*. Le chemin n'était pas simple pendant les 20 premières années de ma vie mais vous étiez là à chaque moment et je vous remercie pour cette présence, même à 870 km de moi. Vous avez toujours cru en moi et m'avez fait confiance et vous en remercie. Merci aussi à *David* qui m'a longtemps supportée au quotidien durant la thèse, même dans les moments plus difficiles.



Enfin je tenais à remercier le *projet ANR (agence nationale pour la recherche) Deffilait (ANR-15-CE20-0014) et Apis-Gene* pour avoir financé les essais et en partie la thèse.



Merci à vous toutes et tous pour ce beau travail que vous avez fourni et pour tous ces moments partagés qui resteront de très bons souvenirs. Merci aussi pour votre soutien le jour J, que ça soit par message ou en live par votre présence à la soutenance, j'étais très touchée par ce soutien que vous m'avez témoigné en puissance le jour J. J'espère que ce manuscrit que vous découvrirez dans les pages suivantes reflète l'ensemble et la qualité de notre travail à tous.

MERCI à Vous !

Préambule

Ce projet a été réalisé dans le cadre d'une thèse Cifre entre l'Institut de l'élevage, l'INRA UMR PEGASE et Agrocampus-Ouest pour l'école doctorale Vie Agronomie Santé basée à Rennes. Les travaux réalisés dans cette thèse ont notamment pu bénéficier des ressources disponibles dans les trois institutions mais aussi dans l'UMT (Unité Mixte Technologique) RIEL (Recherche et Ingénierie en Elevage Laitier). Les travaux de la thèse ont bénéficié du soutien financier du projet ANR Deffilait (ANR-15-CE20-0014) et d'APIS-Gene sur l'amélioration de l'efficacité alimentaire des vaches laitières grâce à de nouveaux outils de phénotypage.

Les stratégies et les résultats de ce projet de thèse ont été communiqués, sous différentes formes (présentation, poster, articles) à l'échelle régionale, nationale et internationale. L'ensemble de ces communications est listé ci-après. Par ailleurs, les questionnements et résultats ont également été discutés en interne au sein du service productions laitières à l'Institut de l'élevage, en réunion de l'unité de programme CATL (Conduite et Alimentation des Troupeaux Laitiers) de l'Institut de l'élevage, dans l'équipe Syslait de l'UMR PEGASE et dans le cadre des animations scientifiques de l'UMR PEGASE.

Communications sur les travaux de la thèse

Communications écrites

- Faverdin P and **Fischer A** 2016. Monitoring du poids et de l'état corporel. In Elevage de précision (eds. S Chastant-Maillard and M Saint-Dizier), pp. 125-144, Editions France Agricole, Paris, France.
- Fischer A**, Delagarde R and Faverdin P 2017a. Identification of biological traits associated with differences in residual energy intake between lactating Holstein cows. *Journal of dairy science*. (*Soumis le 24/01/2017*)
- Fischer A**, Friggens NC, Berry DP and Faverdin P 2017b. Isolating the cow-specific part of residual energy intake in lactating dairy cows using random regressions. *Animal*. (*Retour du 10/02/2017 avec révisions modérées, ressoumis le 01/03/2017*)
- Fischer A**, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2014d. Améliorer la mesure de l'état des réserves corporelles des vaches laitières en analysant la surface 3D du dos de la vache. In 21ème Rencontres Recherches Ruminants, 03-04/12/2014, Paris, France, pp. 23-26.
- Fischer A**, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2015g. Rear shape in 3 dimensions summarized by principal component analysis is a good predictor of body condition score in Holstein dairy cows. *Journal of dairy science* 98, 4465-4476.

Communications orales

- *Présentations*

- Fischer A** and Faverdin P 2016. Rumen temperature monitoring to assess feed efficiency of dairy cows. In 67th Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), 29/08/2016-02/09/2016, Belfast, UK, p. 405.
- Fischer A**, Delagarde R and Faverdin P 2016a. Ability to digest explains part of the between cow feed efficiency variability. In 67th Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), 29/08/2016-02/09/2016, Belfast, UK, p. 549.
- Fischer A**, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2015d. Analyzing the rear shape of dairy cows in 3D to better assess body condition score. In ADSA-ASAS JAM, 12-16/07/2015, Orlando, USA, p. 814.
- Fischer A**, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2014a. Analyzing the back of dairy cows in 3D imaging to better assess body condition. In 65th Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), 25-29/08/2014, Copenhagen, Denmark, p. 127.
- Fischer A**, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2014d. Améliorer la mesure de l'état des réserves corporelles des vaches laitières en analysant la surface 3D du dos de la vache. In 21ème Rencontres Recherches Ruminants, 03-04/12/2014, Paris, France, pp. 23-26.

- **Posters**

- Chanteloube A, Gicquel M, Le Chenadec H, Leroy M, **Fischer A**, Montagne L and Jurquet J 2015. Etat des lieux de l'utilisation de la notion d'efficience alimentaire par la filière bovin lait. In 22ème Journées Rencontres Recherches Ruminants, 02-03/12/2016, Paris, France, p. 257.
- Fischer A**, Lassalas J and Faverdin P 2016b. Identifier les vaches les plus efficaces grâce au monitoring de la température ruminale. In 23ème Journées Rencontres Recherches Ruminants, 07-08/12/2016, Paris, France, p. 51.
- Fischer A**, Luginbuhl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2014c. The rear's 3D shape summarized by principal component analysis predicts well body condition score in Holstein dairy cows. In 1st Dairy care conference, 22-23/08/2014, Copenhagen, Denmark, p. 41.

Communications au sein de la filière laitière et en interne

- **Présentations orales**

- Bédère N, Charton C and **Fischer A** 2015. Adaptabilité des vaches laitières au travers de 3 thèses. In Animation scientifique UMR PEGASE-UMR GenPhyse, 29/02/2016, Rennes, France.
- Fischer A**, Jurquet J, Jacqueroud MP and Faverdin P 2015b. Recherche autour de l'efficience alimentaire des vaches laitières. In Groupe alimentation Pays de la Loire (Chambre d'agriculture), Nantes, France.
- Fischer A**, Jurquet J, Jacqueroud MP and Faverdin P 2015c. Recherche autour de l'efficience alimentaire des vaches laitières. In Groupe alimentation Bretagne (Chambre d'agriculture), Pontivy, France.
- Fischer A**, Jurquet J, Lamy JM and Faverdin P 2016c. L'efficience alimentaire de la vache laitière: un concept mais quelle définition? In Biennales des stations expérimentales professionnelles laitières du grand Ouest, 2ème édition, 02/02/2016, Rennes, France, pp. 70-82.
- Fischer A**, Luginbuhl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2014b. L'imagerie 3D pour évaluer l'état corporel des vaches laitières. In XIIIème journées de l'animation transversale "Glande mammaire, Lait", 20-21/11/2014, Rennes, France.
- Fischer A** and Faverdin P 2016. Déterminants de l'efficience alimentaire de la vache laitière: résultats des 1ères lactations de l'expérimentation. In Assemblée Générale du projet ANR Deffilait, 15/12/2016, Paris, France.

- **Fiches**

- Fischer A**, Jurquet J, Ballot N and Minery S 2015a. Mieux comprendre l'efficience alimentaire des vaches laitières. In (Ed. C Institut de l'élevage), p. 6. CNIEL, Institut de l'élevage, Paris, France.

Minery S, Ballot N, **Fischer A**, Rouillé B and Jurquet J 2017. Comprendre les facteurs de variation de l'efficacité alimentaire des vaches laitières - Programmes de recherche DEFFILAIT et MICROFICIENT. In (Ed. Id l'élevage), p. 6. Institut de l'élevage.

- *Posters*

Fischer A and Faverdin P 2016. Prédire l'efficacité alimentaire à partir du suivi de la température ruminale. In Journées des doctorants UMR PEGASE - UMR ADNC, 19/04/2016, St-Gilles, France.

Fischer A, Luginbuhl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2015e. Evaluer l'état corporel des vaches laitières par imagerie 3D. In Journées d'animation des crédits incitatifs du département PHASE, 05-06/04/2016, Tours, France.

Fischer A, Luginbuhl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2015f. Evaluer l'état corporel des vaches laitières par imagerie 3D. In Les Terrenales 2015, 28-29/05/2015, St-Martin du Fouilloux, France.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 – Synthèse bibliographique.....	17
I. L'efficacité alimentaire : un concept qui n'a pas de définition biologique homogène.....	19
a. Une pluralité de définitions des composantes biologiques à inclure dans les ressources et les produits pour estimer l'efficacité, surtout pour les femelles reproductrices productrices.....	19
b. La place des variations de réserves corporelles dans l'estimation de l'efficacité alimentaire chez les femelles fortes productrices.....	23
II. Une estimation de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire dont la méthodologie n'est pas encore standardisée.....	26
a. Trois types d'indicateur pour estimer l'efficacité alimentaire et sa variabilité interindividuelle.....	26
b. L'estimation de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire par l'ingéré résiduel : de nombreux critères du calcul encore mal définis.....	29
III. Identification de mécanismes biologiques associés à la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire.....	33
a. Les mécanismes biologiques identifiés comme étant associés aux différences d'efficacité alimentaire entre animaux.....	33
b. Des approches méthodologiques variées pour identifier les déterminants de l'efficacité alimentaire mais difficiles à appliquer chez la vache laitière.....	39
c. Le développement de nouvelles technologies offre des perspectives pour l'étude des déterminants de l'efficacité alimentaire.....	41
Conclusion générale.....	42
Chapitre 2 – Questions et stratégie de recherche.....	51
I. Construction d'un dispositif expérimental adapté à l'étude des différences interindividuelles de l'efficacité alimentaire par la mesure de l'ingestion résiduelle.....	53
a. Description des rations.....	54
b. Le choix de l'unité des quantités ingérées : l'énergie nette.....	54
c. Le choix des variables explicatives du modèle utilisé pour estimer le REI.....	56
d. La définition de la fréquence et des méthodes de mesure.....	56
II. Objectif 1 : Améliorer la méthode de phénotypage de la variation des réserves corporelles.....	56
III. Objectif 2 : Estimer la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire avec le REI de façon plus robuste.....	58
IV. Objectif 3 : Identifier les facteurs biologiques associés aux différences interindividuelles d'efficacité alimentaire.....	59
V. Objectif 4 : Construire un indicateur indirect de l'efficacité alimentaire sans les mesures des quantités ingérées.....	63

VI. Organisation du manuscrit de thèse.....	64
Chapitre 3 – Amélioration de la méthode de mesure d’un phénotype d’intérêt pour estimer l’efficacité alimentaire des vaches laitières : l’état corporel. Automatisation de la mesure de la note d’état corporel.....	67
I. La preuve du concept	71
II. L’automatisation de l’extraction des quatre points caractéristiques.....	91
Chapitre 4 – Estimation de la variabilité individuelle de l’efficacité alimentaire.....	93
I. Identification d’une période de mesure robuste au cours de la lactation	95
II. Isolation de la part du residual energy intake associée à l’individu et non aux erreurs de mesure et d’ajustement de modèle.....	114
Chapitre 5 – Identification des mécanismes biologiques associés aux différences interindividuelles d’efficacité alimentaire chez la vache laitière.....	137
Chapitre 6 – Construction d’un indicateur indirect de l’efficacité alimentaire sans mesure des quantités ingérées.....	169
Chapitre 7 – Discussion générale.....	183
I. La méthodologie du residual energy intake pour estimer la variabilité interindividuelle de l’efficacité alimentaire.....	185
a. Faible variabilité interindividuelle du REI obtenue, grâce notamment à la qualité et précision des mesures réalisées.....	185
i. Une faible variabilité du REI observée quand les conditions expérimentales sont contrôlées et stables	185
ii. Une variabilité interindividuelle du REI qui est sensible aux méthodes de mesure utilisées	188
b. Des variations des réserves corporelles qui deviennent accessibles à haut débit.....	195
i. Une méthode prometteuse d’estimation de la note d’état corporel par imagerie 3D, mais qui nécessite des ajustements supplémentaires pour une utilisation à haut débit.....	195
ii. Une estimation des variations de réserves corporelles par la modélisation des variations du poids vif.....	199
iii. Une estimation de la masse lipidique et de la masse délipidée qui reste difficile	200
c. L’appréciation de l’efficacité alimentaire par le REI varie en fonction des sources de dépenses énergétiques prises en compte dans le modèle.....	201
II. Les mécanismes biologiques impliqués dans les différences interindividuelles d’efficacité alimentaire chez la vache laitière	205
a. Le besoin d’entretien : une dépense énergétique intéressante ou superflue ?	205
b. La variation des réserves corporelles : une économie de dépense d’énergie ou une perte de qualité d’élevage ?.....	206

c.	L'activité physique : une économie possible d'énergie ou une fonction utile ?.....	208
d.	La digestibilité : un déterminant important de l'efficacité alimentaire ?.....	209
III.	Perspectives d'application en ferme des résultats obtenus.....	212
a.	Choix de l'indicateur à utiliser : REI ou ratio ?.....	212
b.	Estimation de l'efficacité alimentaire en ferme par mesure indirecte sans les mesures des quantités ingérées	214
c.	Définition d'une période de mesure réduite de la lactation aboutissant à une estimation du REI qui est proche du REI estimé sur la lactation totale	216
	Conclusion générale.....	225
	Annexes.....	231

Liste des figures

Introduction générale

- Figure 1** Evolution (—) et simulation (.....) de la population mondiale (■), de la consommation alimentaire mondiale (—), de la consommation mondiale de céréales (—), de la consommation mondiale de produits animaux (—) et de la surface en terres arables (+) entre 1961 et 2050, d'après FAO (2016) et Van Vuuren et al. (2009). 3
- Figure 2** Croissance attendue dans la demande mondiale en produits laitiers (haut) et en bœuf (bas) entre 2000 et 2030 (Robinson and Pozzi, 2011). 4
- Figure 3** Evolution de l'indice des prix agricoles à la production (IPPAP ; base 100 = 2010) pour le prix du lait de vache à la production (—) et pour le prix des céréales à la production (—) (INSEE, 2016). 6
- Figure 4** Détail du coût opérationnel de l'atelier lait de l'élevage laitier français, représenté par 5 systèmes: 3 systèmes de plaine dont un spécialisé, un mixte lait-viande et un en polyculture-élevage et 2 systèmes de montagne dont un spécialisé et un mixte lait-viande (d'après données de INOSYS, 2017). 6
- Figure 5** Triangle de la performance, adapté de Rastoin and Gherzi (2010). 7
- Figure 6** Evolution du lait corrigé de la matière grasse du lait (PL4%) et de l'efficacité alimentaire en fonction des quantités d'énergie nette ingérées (d'après Brun-Lafleur *et al.* 2010). 10
- Figure 7** Relation entre les besoins estimés et les niveaux apportés en teneur en lysine digestible (digestibilité iléale standardisée, SID) de la ration pour une ration triphasée (3P, graphe A) et une ration commerciale (COM, graphe B) et le pourcentage d'animaux suralimentés associés à ces deux gestions d'alimentation (Andretta *et al.*, 2014). 10
- Figure 8** Nombre de publications annuelles sur l'efficacité alimentaire chez le porc (—), la volaille (—), les bovins viande (—) et la vache laitière (—). 12

Chapitre 1 - Synthèse bibliographique

- Figure 1** Effet de la prise en compte de la perte de note d'état corporel sur les 60 premiers jours de lactation dans l'identification des vaches les 10% les plus efficaces (97 vaches ; avec ■ et sans ■) et les 10% les moins efficaces (97 vaches ; avec et sans —) sur la différence de cinétique de note d'état corporel (NEC, graphique adapté de Vallimont *et al.*, 2011). 24
- Figure 2** Régression linéaire (.....) de l'énergie nette (EN) ingérée observée en fonction de l'EN ingérée prédite d'après les principaux besoins énergétiques de la vache laitière : synthèse du lait, entretien, variations des réserves corporelles. La différence entre l'EN ingérée observée et l'EN ingérée prédite (—) définit le residual energy intake (REI). Une différence positive (—), i.e. un REI positif, est associée à une vache inefficace (▼), car elle ingère plus que prévu. Une différence négative (—), i.e. un REI négatif, est associée à une vache efficace (▲), car elle ingère moins que prévu. 28
- Figure 3** Définition des différences interindividuelles de l'ingéré résiduel (RFI ; □) estimé comme la différence entre les quantités ingérées observées (QI) et les QI prédites (■) d'après les principales dépenses énergétiques. 33

Chapitre 2 – Questions et stratégie de recherche

Figure 1 Evolution des quantités ingérées (QI) exprimées en kg de matière sèche (.....) ou en énergie nette (UFL, ----) et de la densité énergétique (—) au cours de la lactation pour une vache du troupeau. Les flèches (↓) indiquent les changements de silo pour l'ensilage de maïs. 55

Figure 2 Récapitulatif des mesures et fréquence de mesure réalisées pour chacune des 60 vaches Holstein suivies à l'installation expérimentale de Méjusseaume. Les variables sont soit utilisées pour estimer l'ingéré résiduel (★), soit pour expliquer les différences d'ingéré résiduel (▲). 61

Figure 3 Structure du projet de recherche découpé en ses 4 sous-objectifs et organisation du manuscrit. 64

Chapitre 3 - Automatisation de la mesure de la note d'état corporel

Figure 1 Methodology to estimate BCS with 3-dimensional surfaces: calibration, external validation, repeatability, and reproducibility and use for scoring. 76

Figure 2 Three-dimensional (3D) surface processing to extract the 3D information common to the set of 3D surfaces used for the calibration: example of 2 3D surfaces, one initially composed of n 3D points and one with p 3D-points ($n > p$). The first step (1) rescales the individual format of each 3D surface (white trapezoid) on a common rear format (dashed black trapezoid), and second step (2) superimposes the 3D surfaces used for the calibration to find the set of 3D points common to the 3D surfaces used for the calibration (white rectangle with X common 3D points; $n > p > X$). 78

Figure 3 Localization of the 4 anatomical landmarks hook bone left (HBL), hook bone right (HBR), sacrum basis left (SBL), and sacrum basis right (SBR) used to normalize the 3-dimensional surfaces and their coordinates after size standardization. 78

Figure 4 Description of data sets used for (a) the calibration, (b) the validation for validationset_stage and (c) the validation for validationset_cows and (d) the repeatability-reproducibility according to their BCS, BW, and DIM for primiparous (Δ) and multiparous cows (◆). 82

Figure 5 Validation of 3D BCS for both data sets (a) validationset_stage and (b) validationset_cows regarding manual BCS. The line of best fit is the solid line and the line of perfect concordance (slope of 1 and intercept of 0) is the dashed line. 84

Chapitre 4 – Estimation de la variabilité individuelle de l'efficacité alimentaire

I. Identification d'une période de mesure robuste au cours de la lactation

Figure 1 Kinetic of the regression coefficients for metabolic body weight (metabolic BW), for milk net energy output (NEL) and for body reserves change ($BW \times \Delta BCS$), as well as the kinetic of the adjusted coefficient of determination (adjusted R^2) and the residual standard error (RSE) of the linear regression adjusted within each fortnight (used to estimate REI_lin). 104

Figure 2 Coefficient of correlation matrix of residual energy intake assessed for the 17 lactation fortnights and identification of efficient similar periods of lactation: fortnight 1 to 4 (F1 to F4), 5 to 8 (F5 to F8) and 9 to 17 (F9 to F17). 105

Figure 3 (A) Kinetic of mean residual energy intake (REI) estimated per fortnight throughout lactation and (B) kinetic of the coefficient of correlation between REI estimated using fortnight averaged variables with REI estimated using lactation averaged variables. 107

Figure 4 Kinetic of dry matter intake (▲), milk yield (◆), body condition score (BCS, ▼) and residual energy intake (REI, ■) throughout the 17 lactation fortnights. 110

II. Isolation de la part du residual energy intake associée à l'individu et non aux erreurs de mesure et d'ajustement de modèle

Figure 1 Decomposition of the residual energy intake (REI) for 2 dairy Holstein cows (● and ▲) having 17 measures for 2 variables X and Y, using either a linear model without a random cow effect or a mixed model with a random cow effect on the coefficient for a model predicting trait Y with one independent variable called X, with the random slope for X (—) and the population mean regression line (— · —). 122

Figure 2 The relationship between mean residual energy intake (REI) estimated over the lactation with a linear fixed regression and the cow-specific predicted net energy intake (Cowspec_predNEI) estimated as lactation mean from four different mixed models characterized by different random coefficients. The regression (n = 119 Holstein cows) is indicated by the solid line with its equation, R² and rSD. The line Y=X is shown as a stippled line and the mean value by a diamond. 127

Chapitre 5 – Identification des mécanismes biologiques associés aux différences interindividuelles d'efficacité alimentaire chez la vache laitière

Figure 1 Daily kinetic taken from a lactating dairy cow for a given day of raw rumen temperature (— —) and of drinking corrected rumen temperature (——). Each drinking begins at fall of raw rumen temperature (▼). 148

Figure 2 Evolution of the root mean squared error of prediction (RMSEP) (A) according to the number of latent variables kept in the partial least square regression (PLSr) and (B) after selecting the right number of latent variables, according to the number of input variables kept in the PLSr to build the latent variables. The black diamond is for the minimum RMSEP on both graphs, for a population gathering 60 lactating dairy cows. NE is for net energy. 150

Figure 3 Contribution of each lactation averaged biological trait to both lactation averaged net energy intake (NEI) and feed efficiency measured with lactation averaged residual energy intake (REI) on 60 lactating dairy cows. 152

Figure 4 Relationship between observed residual energy intake (REI) and predicted REI. The dataset gathered 60 lactating dairy cows. The first bisector is shown with dotted line (...), the least squared regression line with the solid line (-) and the least rectangle fit with the dashed line (---). 152

Figure 5 Lactation averaged kinetic of behavior and standing pattern throughout the daily 24 hours. Three groups were built: one with the 10% most efficient (▲ efficient, 6 cows), one with the 10% least efficient (▼ inefficient, 6 cows) and the rest of the lactating dairy cows (◆ medium, 48 cows). Groups having different letter superscript for the same hour are significantly different at P < 0.05. The dark grey rectangles are for hours where cows have not access to feed and light grey rectangles are for hours where cows are locked at the feed fence. 157

Chapitre 6 – Construction d'un indicateur indirect de l'efficacité alimentaire sans mesure des quantités ingérées

Figure 1 Exemple d'une cinétique journalière pour une vache en lactation de la température ruminale brute (— —) et de la température ruminale corrigée de l'effet boisson (——). Chaque boisson est

repérée par une chute de la température ruminale (\blacktriangledown). La surface grisée correspond à la variable Ecart_temp. 176

Figure 2 Relation entre l'efficacité alimentaire estimée par le résiduel energy intake (REI) et A : le cumul des écarts quotidiens entre la température ruminale corrigée de l'effet boisson et la température ruminale brute (Ecart_temp) ; B : l'eau buée résiduelle (EBR) estimée comme le résidu de la régression linéaire de Ecart_temp en fonction du volume de lait produit et du poids vif. Le REI est le résidu de la prédiction de l'énergie nette ingérée par les dépenses pour la synthèse de lait, l'entretien et la perte et le gain de réserves corporelles. Les groupes extrêmes sont identifiés sur les deux graphiques avec les 10% les plus efficaces, les 10% les moins efficaces et le reste par la forme pour le REI (Δ pour les efficaces, ∇ pour les inefficaces et \square pour le reste) et par la couleur pour l'EBR (**vert** pour les efficaces, **rose** pour les inefficaces et **gris** pour le reste). Les vaches classées dans la même catégorie pour l'EBR et le REI et pour le REI et Ecart_temp sont symbolisées par une forme pleine. 179

Chapitre 7 – Discussion générale

Figure 1 Relation entre l'ingéré résiduel (IR) quand les vaches (n = 109) sont alimentées avec une ration riche ou pauvre en amidon (issu de Potts *et al.*, 2015). Le jeu de données rassemble 4 expérimentations différentes (\blacklozenge , \blacksquare , \blacktriangle , \bullet) et des vaches primipares (formes ouvertes) et multipares (formes pleines). Les lignes pointillées représentent +/- 0,5 écart-type de l'IR pour les deux rations et la ligne en tiret (- - -) représente la première bissectrice. Les vaches classées dans le même groupe d'efficacité sont dans les zones vertes, celles qui ont juste changé d'un classement sont dans les zones oranges et celles qui sont passées dans le groupe opposé sont dans les zones rouges. 186

Figure 2 Influence du nombre de mesures réalisées pour les matières sèches ingérées (QI, Δ) ou le poids vif (PV) et l'énergie nette du lait (ENL, X) ou les trois variables en même temps (∇) au cours des 238 jours de lactation sur l'écart-type (E.T.) de l'ingéré résiduel (REI) obtenu et sur le coefficient de corrélation (r) entre le REI obtenu aux différentes fréquences et le REI de référence calculé avec la fréquence maximale. 191

Figure 3 Comparaison des residual energy intake (REI) obtenus en utilisant trois méthodes différentes d'estimation des variations des réserves corporelles : la note d'état corporel (NEC, modèle 1), le poids vif (PV, modèle 2) et le poids vif vide (PVV, modèle 3). Le REI a été défini comme résidu de la prédiction de l'énergie nette ingérée par l'énergie nette du lait (ENlait), le poids vif métabolique ($PV^{0,75}$) et la perte de réserves corporelles sur la lactation et le gain de réserves corporelles sur la lactation. 193

Figure 4 Exemples de cinétiques de note d'état corporel mesurée par palpation (NEC \blacktriangledown) ou par imagerie 3D (NEC3D \blacktriangle), du poids vif (PV \blacklozenge) et du PV corrigé de 4,5 fois la matière sèche ingérée (PVV \blacksquare) pour 6 vaches pour lesquelles la NEC3D fonctionne bien. Les événements non repérés par la NEC mais repérés par la NEC3D et le PVV sont marqués par \uparrow . Les NEC3D détectées aberrantes sont symbolisées par (Δ). 196

Figure 5 Exemples d'images 3D obtenues pour une vache avec le système d'acquisition original avec une image de bonne qualité (gauche) et de mauvaise qualité (droite) et avec le système d'acquisition instantanée (milieu). 197

Figure 6 Exemples de cinétiques de note d'état corporel mesurée par palpation (NEC \blacktriangledown) ou par imagerie 3D (NEC3D \blacktriangle), du poids vif (PV \blacklozenge) et du PV corrigé de 4,5 fois la matière sèche ingérée

(PVV ■) pour des vaches bougeant régulièrement durant l'acquisition. Les NEC3D aberrantes sont symbolisées par (△).....	198
Figure 7 Comparaison des quantités ingérées mesurées (—) et prédites (-----) à partir de la production laitière, du poids vif et de la densité énergétique de la ration, au cours des quatre premiers mois de lactation pour deux vaches laitières Holstein (issu de Charrier, 2015).....	200
Figure 8 Contribution de chacun des facteurs biologiques moyennés sur la lactation à la variabilité du residual energy intake (REI). Le REI a été estimé comme le résidu de la prédiction de l'énergie nette ingérée à partir des dépenses énergétiques associées à la synthèse de lait, l'entretien, la perte et au gain de réserves corporelles (diagramme à gauche) ou uniquement à partir des dépenses associées à la synthèse de lait et à l'entretien (diagramme à droite).....	204
Figure 9 Relation entre le nombre de chaleurs détectées par le capteur et l'efficacité alimentaire mesurée par le residual energy intake (REI) comme le résidu de la prédiction de l'énergie nette ingérée à partir de l'énergie nette du lait, le poids vif métabolique et la perte et le gain de note d'état corporel.	209
Figure 10 Relation entre le taux de récupération du marqueur ytterbium (Yb) et la différence de digestibilité de la matière sèche obtenue avec la méthode indirecte par marqueur ytterbium (Yb) et avec la méthode de référence <i>In Vivo</i> , pour deux périodes consécutives (+ et ♦) (d'après Denouel, 2016).....	210
Figure 11 Relation entre l'efficacité alimentaire mesurée par le ratio entre l'énergie nette (EN) du lait et l'EN ingérée et par le residual energy intake (REI) estimé comme le résidu de la prédiction de l'EN ingérée à partir de l'EN lait, du poids vif métabolique, de la perte et du gain de note d'état corporel (graphe de gauche) ou uniquement à partir de l'EN du lait (graphe de droite).....	213
Figure 12 Relation entre le residual energy intake (REI) calculé avec des variables moyennées sur la lactation (17 premières quinzaines) et le REI calculé avec des variables moyennées sur 2 mois et demi (quinzaines 7 à 11 de la lactation). Les REI ont été estimés comme les résidus de la prédiction de l'énergie nette ingérée à partir des dépenses associées à la synthèse de lait, l'entretien, la perte et au gain de réserves corporelles.	218

Liste des tableaux

Chapitre 1 – Synthèse bibliographique

Tableau 1 Comparaison de la définition des ressources et produits utilisés pour estimer l'efficacité alimentaire dans la bibliographie pour différentes espèces animales.....	20
Tableau 2 Description des modèles utilisés chez la vache laitière dans la bibliographie pour estimer l'efficacité alimentaire d'après : les méthodes de mesure des quantités ingérées (QI), les produits, les facteurs fixes du modèle, la ration, l'effectif étudié, la durée de la période de lactation étudiée, la nature du modèle, le coefficient de détermination du modèle (R^2) et l'absence (ND) ou la présence (oui) de la publication des coefficients de la régression (Coeff.).....	21
Tableau 3 Comparaison des fréquences et méthodes de mesure utilisées pour mesurer les quantités ingérées (QI) et les différents produits pris en compte pour calculer l'ingéré résiduel (IR), ainsi que le coefficient de variation (CV) de l'IR, le coefficient de détermination (R^2) du modèle, le type de ration et la durée de la période de mesure.	30
Tableau 4 Périodes de mesure de l'ingéré résiduel (IR) au cours de la lactation, répétabilité intra- et inter-lactation et corrélation intra-lactation de l'IR chez la vache laitière et héritabilité de l'IR recensés dans la bibliographie pour différentes espèces animales.....	32
Tableau 5 Synthèse bibliographique multi-espèces des caractères biologiques déjà testés pour leur relation avec la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire.	34

Chapitre 2 – Questions et stratégie de recherche

Tableau 1 Composition, valeur énergétique nette (UFL) et protéines digestibles (PDIE) des rations distribuées sur toute la lactation aux 60 vaches Holstein de Méjusseume et aux 59 vaches Holstein des Trinottières.....	55
--	----

Chapitre 3 - Automatisation de la mesure de la note d'état corporel

Table 1 Repeatability and reproducibility of the measures of body condition scored by experts and of BCS assessed by 3-dimensional (3D) method ¹	85
--	----

Chapitre 4 – Estimation de la variabilité individuelle de l'efficacité alimentaire

I. Identification d'une période de mesure robuste au cours de la lactation	
Table 1 Mean and SD of net energy intake (NEI), energy expenditure traits and residual energy intake (REI) for lactation and fortnight databases.	103
Table 2 Coefficients and quality of fit resulting from linear modelling on lactation timescale (Lact.) and on fortnight timescale (Fort.) either with mixed model (Mix) or linear model adjusted within fortnight (LIN).....	105
II. Isolation de la part du residual energy intake associée à l'individu et non aux erreurs de mesure et d'ajustement de modèle	
Table 1 Mean and standard deviation of net energy intake (NEI) and energy expenditure traits, either calculated across the whole lactation (lact.) or in successive fortnightly periods (fort.) with standard deviation calculated within or between cows.	124

Table 2 Fixed coefficients and quality of fit of the linear regression using lactation averaged variables and the random regression using fortnight averaged variables.	124
Table 3 Description of the mixed model which converged: estimates of the fixed coefficients, estimates of the standard deviation (SD) of the random coefficients and standard error (Sy.x) of the estimated SD of the random coefficients.....	125
Table 4 Comparison of publications in dairy cows for coefficient of variation (CV _{approx}) of residual energy intake (REI) or residual feed intake (RFI), the coefficient of determination (R ²) of the model, and the measurement frequency of intake and the model traits.	129

Chapitre 5 – Identification des mécanismes biologiques associés aux différences interindividuelles d’efficacité alimentaire chez la vache laitière

Table 1 Review of biological traits recorded to explain residual feed intake variability.	144
Table 2 Comparison of efficient (L-REI, 6 cows), medium (Medium, 48 cows) and inefficient (H-REI, 6 cows) groups of cows according to their lactation average values for net energy intake (NEI) and the potential determinants of feed efficiency. Pearson correlation (r) between each variable and residual energy intake (REI) and variables selected by partial least square regression (PLSR) are also indicated.	154
Table 3 Variance and correlation matrix of the lactation averaged measured traits for the population of 60 Holstein cows with the Pearson correlations below the diagonal and the variance in bold on the diagonal.	155
Table 4 Mean, standard deviation (SD), minimum (Min) and maximum (Max) of lactation averaged variables (60 Holstein cows) included in the feed efficiency model (REI model component) and of the potential determinants of feed efficiency (Determinants).	159

Chapitre 6 – Construction d’un indicateur indirect de l’efficacité alimentaire sans mesure des quantités ingérées

Tableau 1 Moyenne, écart-type (ET), minimum et maximum des variables moyennées sur la lactation (60 vaches Holstein sur les 238 premiers jours de lactation).	178
Tableau 2 Comparaison des 10% de vaches efficaces (Eff., 6 vaches), 10% de vaches inefficaces (Ineff., 6 vaches) et du reste (Medium, 48 vaches) d’après le residual energy intake (REI) et d’après l’eau bue résiduelle (EBR) pour la valeur moyenne sur la lactation de l’énergie nette ingérée (ENI) et les potentiels déterminants de l’efficacité alimentaire.	181
Tableau 3 Tableau croisé du nombre de vaches identifiées comme les 10% les plus efficaces (Eff.), 10% les moins efficaces (Ineff.) et le reste du troupeau (Medium) d’après le residual energy intake (REI), utilisé comme référence, et d’après deux indicateurs : l’eau bue résiduelle (EBR) et Ecart _{temp}	181

Chapitre 7 – Discussion générale

Tableau 1 Description des modèles utilisés chez la vache laitière dans la bibliographie pour estimer l’efficacité alimentaire d’après : les méthodes de mesure des quantités ingérées (QI), les produits, les facteurs fixes du modèle, la ration et sa constance au cours de l’expérimentation, la durée de la période de lactation étudiée, la nature du modèle et le coefficient de détermination du modèle (R ²).	187
---	-----

Tableau 2 Comparaison des fréquences et méthodes de mesure utilisées pour mesurer les quantités ingérées (QI) et les différentes dépenses prises en compte pour calculer l'ingéré résiduel (IR), ainsi que le coefficient de variation (CV) de l'IR, le coefficient de détermination (R^2) du modèle, le type de ration et la durée de la période de mesure.	189
Tableau 3 Comparaison des caractéristiques des 3 régressions linéaires ajustées pour estimer le residual energy intake (REI) comme résidus de la prédiction de l'énergie nette ingérée (ENI) à partir de combinaisons différentes de l'énergie nette du lait (ENlait), du poids vif métabolique ($PV^{0,75}$) et des pertes (ΔNEC^-) et gains (ΔNEC^+) de note d'état corporel.	203
Tableau 4 Matrice de corrélations entre les residual energy intake (REI) obtenus pour 4 modèles de régression différents et différentes variables du modèle d'estimation de ces REI. Les quatre modèles sont des combinaisons différentes des variables explicatives : énergie nette du lait (ENlait), poids vif métabolique ($PV^{0,75}$) et pertes (ΔNEC^-) et gains (ΔNEC^+) de note d'état corporel.	204
Tableau 5 Corrélations de Pearson de deux indicateurs d'efficacité alimentaire, le ratio (Ratio) entre l'énergie nette du lait (ENlait) et l'énergie nette ingérée et le résidu (REI) de la régression de l'énergie nette ingérée en fonction de l'ENlait, avec les variables de base couramment prises en compte pour estimer l'efficacité alimentaire.	213
Tableau 6 Corrélation entre l'ingéré résiduel calculé avec des variables moyennées sur la lactation (REI lactation ; 17 premières quinzaines) et calculé avec des variables moyennées par sous-période de lactation. Les REI calculés par sous-périodes sont aussi décrits par leur écart-type (E.T. REI). Les sous-périodes sont décrites selon la longueur de la période et la période de lactation concernée exprimée en quinzaines de lactation. Les ingérés résiduels sont calculés comme les résidus du modèle qui explique l'énergie nette ingérée à partir de l'énergie nette du lait, du poids vif métabolique et de la perte et du gain de note d'état corporel multiplié par le poids vif (modèle 1 ci-dessous).	217

Liste des abréviations

Français		English	
<i>Abbréviation</i>	Définition	<i>Abbreviation</i>	Definition
3D	tridimensionnel	3D	three dimensioned
AGNE	acides gras non-estérifiés	NEFA	non-esterified fatty acids
BE	bilan énergétique alimentaire	-	-
BEc	BE corrigé des variations de réserves corporelles	-	-
CV	coefficient de variation	CV	coefficient of variation
-	-	CVapprox	CV estimated for REI or RFI as the SD of REI or RFI divided by mean net energy intake or dry matter intake
-	-	CVr/CVR	CV for repeatability / reproducibility
-	-	DIM	days in milk
EBR	eau bue résiduelle	-	-
ECA	énergie de conversion alimentaire	FCR	feed conversion ratio
Ecart_temp	cumul journalier de l'écart entre la température ruminale corrigée de l'effet boisson et la température brute	-	-
EN	énergie nette	NE	net energy
ET	écart-type	SD	standard deviation
-	-	HBL / HBR	hool bone left / hook bone right
IR	ingéré résiduel	RFI	residual feed intake
-	-	REI	residual energy intake
-	-	MilKE or NEL	net energy in milk
MIR	moyen infra-rouge	-	-
MS	matière sèche	DM	dry matter
-	-	MSEP	mean standard error of prediction
MSI	MS ingérée	DMI	DM intake
NEC	note d'état corporel	BCS	body condition score
ΔNEC+	gain de NEC cumulé sur la période de mesure	ΔBCS+	cumulated gain of BCS over the measurement period
ΔNEC-	perte de NEC cumulée sur la période de mesure	ΔBCS-	cumulated loss of BCS over the measurement period
NEC-3D	NEC estimée par imagerie 3D	3D-BCS	BCS estimated with 3D pictures
NEC-3Dauto	NEC-3D estimée avec l'extraction automatique des points caractéristiques	-	-

<i>Français</i>		<i>English</i>	
<i>Abbréviation</i>	Définition	<i>Abbréviation</i>	Définition
<i>NEC-3Dmanu</i>	NEC-3D estimée avec l'extraction manuelle des points caractéristiques	-	-
-	-	<i>PCA</i>	principal component analysis
<i>PDIE</i>	protéines digestibles	<i>PDIE</i>	digestible proteins
-	-	<i>PLSr</i>	partial least square regression
<i>PV</i>	poids vif	<i>BW</i>	body weight
<i>PVV</i>	poids vif vide	-	-
<i>QI</i>	quantités ingérées	-	-
-	-	<i>REI_lin</i>	REI estimated with a linear regression adjusted within each fortnight
-	-	<i>REI_mix</i>	REI estimated with a mixed model with fortnight repeated measures
-	-	<i>RMSEP</i>	root mean standard error of prediction
-	-	<i>SBL / SBR</i>	sacrum basis left / sacrum basis right
-	-	<i>TMR</i>	total mixed ration
<i>UFL</i>	unité fourragère lait	-	-
-	-	<i>Validationset_cows</i>	dataset used for 3D-BCS validation using cows different from those used for calibration
-	-	<i>Validationset_stage</i>	dataset used for 3D-BCS validation using cows used for the calibration but on a different lactation stage

Introduction générale

D'ici 2050, la population mondiale devrait connaître une croissance démographique moyenne de 32% par rapport à 2015 (Figure 1) pour atteindre 9,7 milliards d'individus (United Nations, 2015). Cette croissance moyenne cache une large variabilité de croissances attendues avec un maximum de 109% en Afrique et une démographie décroissante de 4% au sein de l'Union Européenne (United Nations, 2015). La demande alimentaire qui en résulterait nécessite une augmentation de production de 1,3 milliards de tonnes de céréales par rapport à la référence de production de 2000 (Figure 1) (Gill, 2013). Avec des pratiques similaires à l'an 2000, 40% de cette production servirait uniquement à l'alimentation animale. Bien que la consommation humaine de protéines animales soit en baisse dans les pays développés, l'accélération de la transition alimentaire observée dans les pays en voie de développement conduit à une augmentation de la consommation mondiale de viande bovine et surtout de poudre de lait (Figure 2 A &B) (McNeill, 2013).

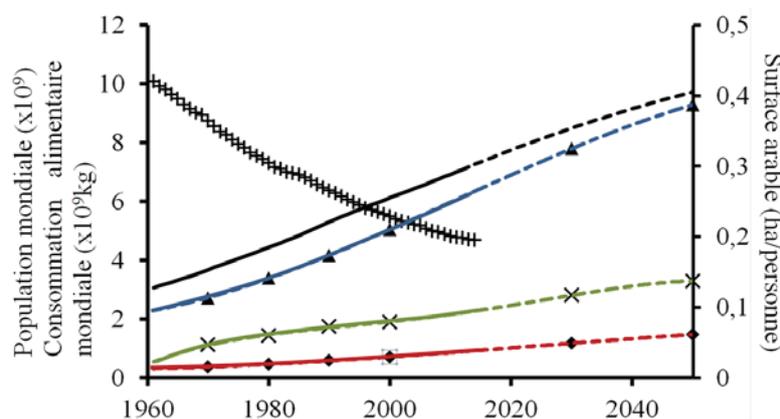


Figure 1 Evolution (—) et simulation (.....) de la population mondiale (—), de la consommation alimentaire mondiale (—), de la consommation mondiale de céréales (—), de la consommation mondiale de produits animaux (—) et de la surface en terres arables (+) entre 1961 et 2050, d'après FAO (2016) et Van Vuuren *et al.* (2009).

Les produits animaux fondamentaux pour répondre à la demande croissante en protéines attendue pour l'alimentation humaine

L'élevage est identifié comme un acteur important pour satisfaire cette demande croissante en ressources protéiques pour l'alimentation humaine : d'une part en augmentant la production de protéines animales telles que le lait, la viande et les œufs, et d'autre part en cherchant à réduire l'utilisation des ressources alimentaires destinées à l'élevage et notamment celles directement consommables par l'homme. En réduisant la consommation en ressources

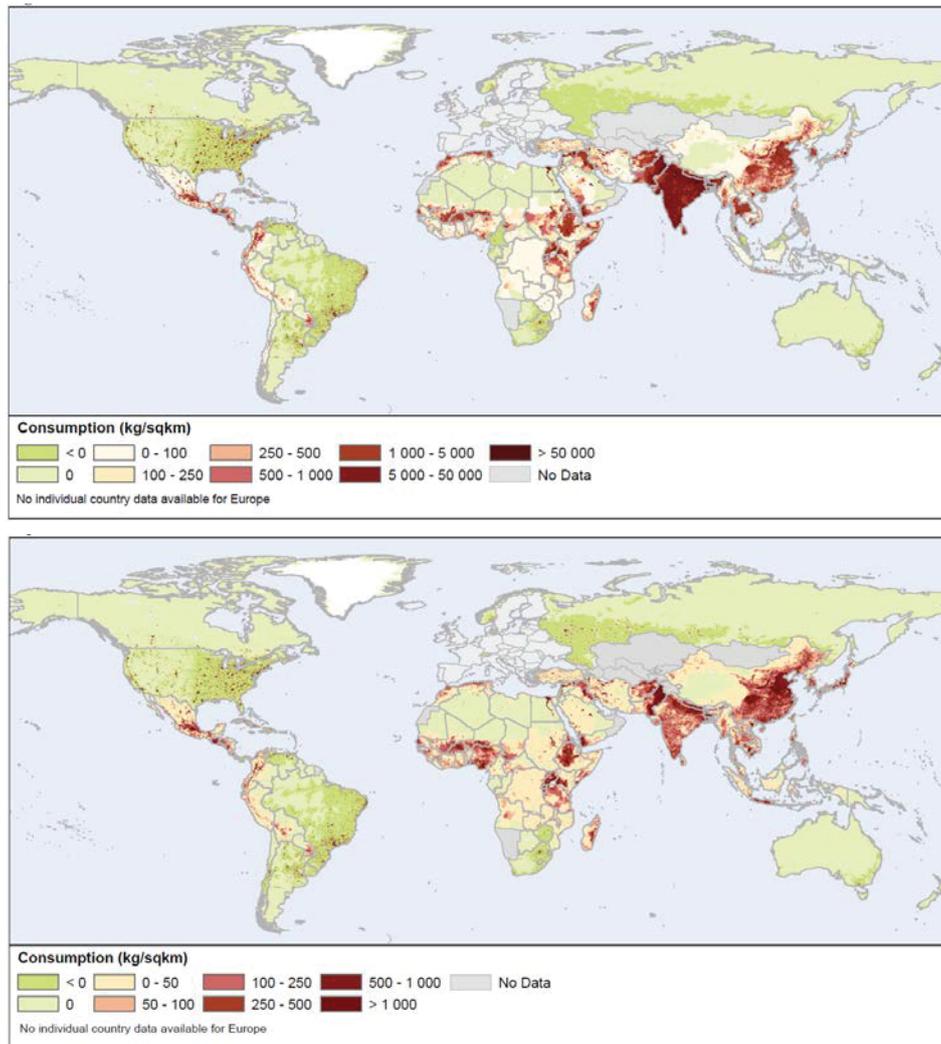


Figure 2 Croissance attendue dans la demande mondiale en produits laitiers (haut) et en bœuf (bas) entre 2000 et 2030 (Robinson and Pozzi, 2011)

nécessaires pour nourrir le troupeau, l'élevage libère aussi des surfaces arables, potentiellement utilisables pour des cultures destinées à l'alimentation humaine. Cet enjeu est d'autant plus important que la pression foncière augmente avec la croissance démographique (Figure 1). L'élevage doit donc mieux valoriser les ressources alimentaires utilisées, notamment en diminuant la consommation des ressources alimentaires tout en maintenant ou augmentant la production de produits animaux consommables par l'homme : c'est l'amélioration de l'efficacité alimentaire de l'élevage.

L'élevage de ruminants est d'autant plus concerné parce que les ruminants sont capables de transformer des protéines non consommables par l'homme, telles que celles contenues dans l'herbe, en protéines animales consommables par l'homme telles que la viande ou le lait. Les ruminants, et plus particulièrement les bovins laitiers, ont des rations riches en aliments peu

consommables par l'homme tels que les fourrages qui représentent entre 62 et 94% de la ration brute dans les systèmes d'élevage français (Devun and Guinot, 2012). Les ruminants sont donc efficaces pour transformer des aliments non consommables par l'homme en aliments consommables par l'homme (Wilkinson, 2011, Laisse *et al.*, 2016). Les systèmes bovins laitiers français consomment actuellement entre 0,4 et 1 kg de protéines consommables par l'homme pour produire 1 kg de protéines animales (Laisse *et al.*, 2016). Cette consommation de protéines consommables par l'homme par les bovins laitiers est d'autant plus faible que la part des fourrages est importante dans la ration, notamment la part de l'herbe qui est considérée comme non consommable par l'homme (Laisse *et al.*, 2016). Par comparaison avec d'autres espèces d'élevage, les vaches laitières ou les jeunes bovins consomment par exemple entre 0,71 et 2 kg de protéines consommables par l'homme alors que les porcs et les poules pondeuses consomment entre 2,1 et 2,6 kg de protéines consommables par l'homme pour produire 1 kg de protéines animales (Wilkinson, 2011). Toutefois, le remplacement des protéines animales consommées par l'homme par des protéines végétales impliquerait une augmentation de 20% des protéines végétales à produire pour satisfaire les besoins en acides aminés de l'homme (Rémond, 2014) et des conversions importantes des habitudes alimentaires. Les produits animaux et plus particulièrement ceux issus de l'élevage laitier apparaissent donc comme fondamentaux pour satisfaire la demande croissante en protéines consommables par l'homme, avec une forte demande attendue dans les pays en développement (Figure 2).

Un contexte économique difficile pour l'élevage laitier à cause de la volatilité des prix des matières premières et d'une place importante de l'alimentation dans les charges des exploitations laitières

Depuis la fin des quotas laitiers européens en mars 2015, le prix du lait est soumis aux fluctuations du marché mondial, au même titre que le prix des aliments (Figure 3). Cette conjoncture rend les élevages laitiers plus fragiles sur le plan économique, notamment quand le prix du lait ne couvre plus le coût de production totale (Figure 4), parfois même avec les aides PAC et les autres produits de l'exploitation. En France, le coût de l'alimentation du bétail est un poste important des coûts opérationnels de l'atelier lait. Ce coût varie de 74 à 78% (Figure 4) et dépend notamment de la part d'herbe pâturée dans le système car l'herbe pâturée reste un fourrage à bas coût. Cette variabilité est caractéristique des systèmes ruminants car la composition des rations est très variable selon les systèmes, notamment liée à la diversité des fourrages utilisés. Parce que l'atelier alimentation du bétail occupe une place

importante dans les charges des exploitations de type « bovins laitiers » et est un levier actionnable au cas de crise, la réduction du poste alimentation constitue aujourd’hui un enjeu majeur pour améliorer la compétitivité des exploitations laitières. Une solution envisagée est de réduire l’utilisation des ressources alimentaires tout en maintenant le même niveau de production, i.e. d’améliorer l’efficacité alimentaire.

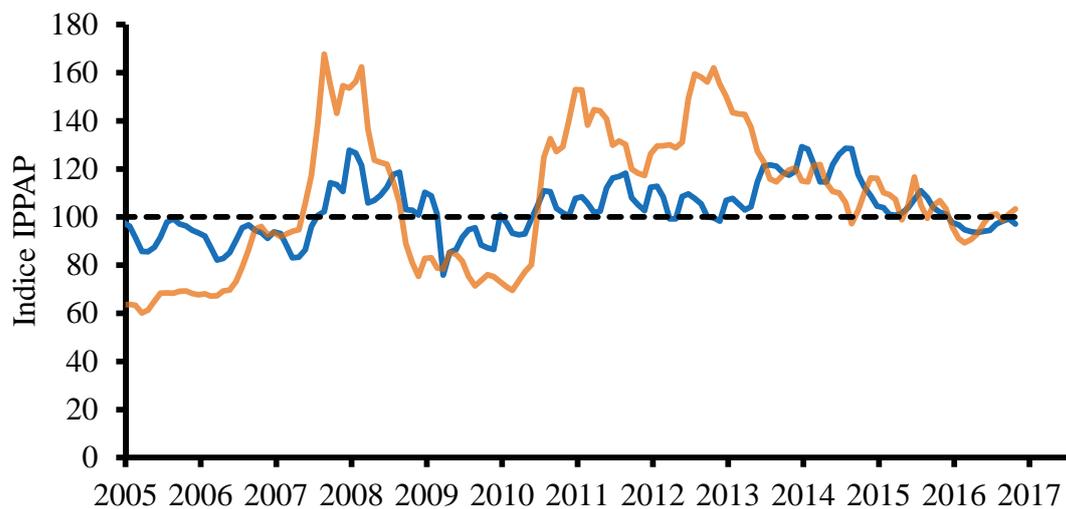


Figure 3 Evolution de l'indice des prix agricoles à la production (IPPAP ; base 100 = 2010) pour le prix du lait de vache à la production (—) et pour le prix des céréales à la production (—) (INSEE, 2016).

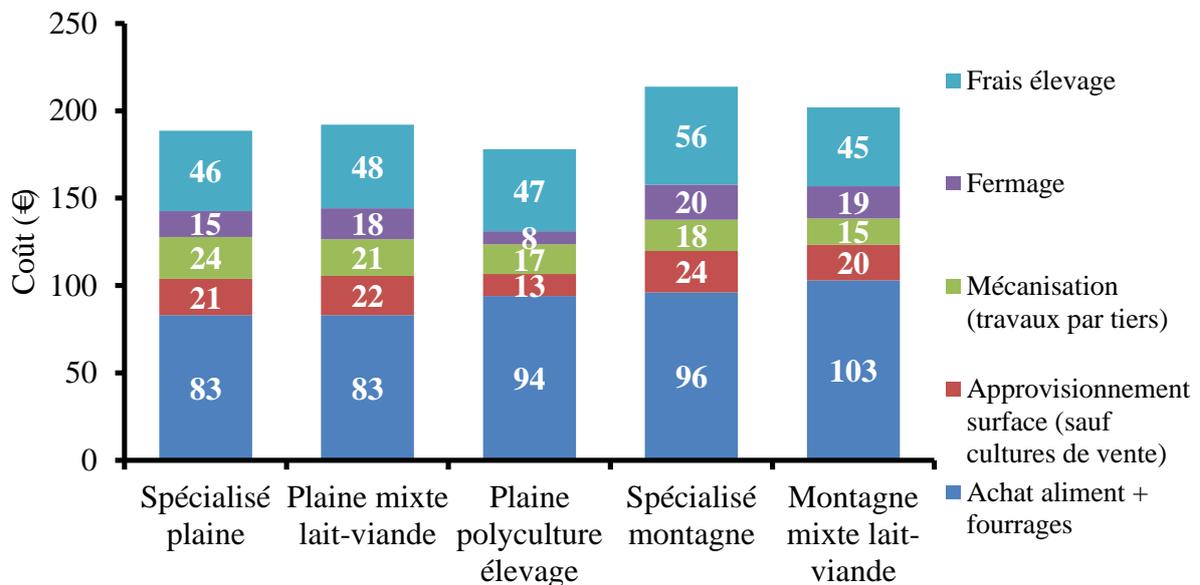


Figure 4 Détail du coût opérationnel de l'atelier lait de l'élevage laitier français, représenté par 5 systèmes: 3 systèmes de plaine dont un spécialisé, un mixte lait-viande et un en polyculture-élevage et 2 systèmes de montagne dont un spécialisé et un mixte lait-viande (d'après données de INOSYS, 2017).

Améliorer l'efficacité ou l'efficacité alimentaire en élevage laitier ?

En France l'expression couramment employée pour parler d'efficacité alimentaire est par défaut "efficacité alimentaire". En partant de l'expression anglaise « feed efficiency », la traduction la plus adaptée serait "efficacité alimentaire" et non "efficacité alimentaire", qui se traduit « feed efficacy » en anglais. L'efficacité et l'efficacité sont des concepts bien distincts dans certaines disciplines, en particulier l' conomie. Les concepts d'efficacité, d'efficacité et de pertinence sont couramment utilisés pour évaluer la performance économique d'une entreprise ou d'un système. L'efficacité est le rapport entre les résultats obtenus et les ressources utilisées pour y arriver alors que l'efficacité est le rapport entre les résultats obtenus et les objectifs fixés (Figure 5). Un individu est efficace s'il remplit les objectifs fixés. Il est plus efficace qu'un autre si ramené à un même niveau de résultats réalisés, il a mobilisé moins de ressources que l'autre, ou si avec les mêmes ressources mobilisées, il a obtenu plus de résultats.

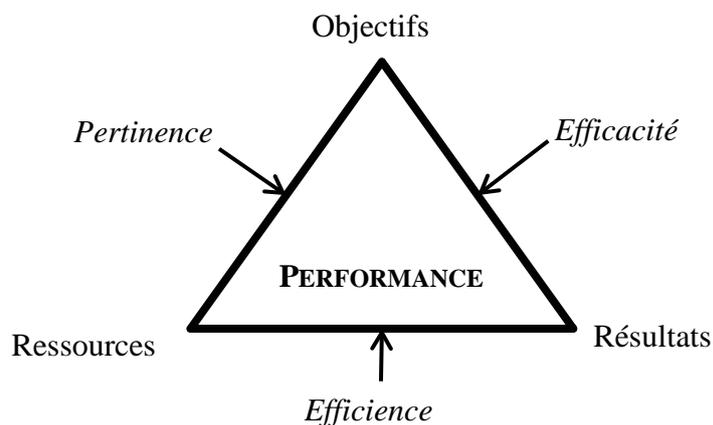


Figure 5 Triangle de la performance, adapté de Rastoin and Gherzi (2010).

L'enjeu identifié par les filières d'élevage est bien d'accroître leur performance globale. Les enjeux globaux doivent aider à définir les objectifs à atteindre et les ressources disponibles pour y parvenir. Appliquée à un système d'élevage, l'efficacité alimentaire confronte la production réalisée à l'ensemble des ressources alimentaires mobilisées pour y parvenir, alors que l'efficacité se définit comme l'adéquation entre les objectifs fixés pour l'élevage et les résultats obtenus. L'amélioration de l'efficacité est donc un élément important de la stratégie de l'amélioration de la durabilité en élevage sous réserve que les ressources allouées sont bien pertinentes et que les résultats obtenus sont bien en accord avec les objectifs fixés.

L'utilisation optimale des ressources alimentaires pour une production de protéines animales est la résultante de l'efficacité alimentaire individuelle et de la gestion de l'ensemble du

troupeau. Améliorer l'efficacité alimentaire du troupeau passe par l'augmentation de la production et/ou par la réduction de la consommation alimentaire.

Améliorer l'efficacité alimentaire en élevage...

...à l'échelle du troupeau

Un concept « simple » pour améliorer l'efficacité alimentaire est d'augmenter la part des ressources alimentaires consommées allouée à la production d'intérêt : le lait pour les vaches laitières, la viande pour les animaux à l'engrais ou les œufs pour les animaux de ponte ; et à l'inverse de réduire la part de l'alimentation utilisée pour couvrir d'autres besoins qui ne relèvent pas directement de la fonction de production d'intérêt. La réduction de la durée des périodes pendant lesquelles les animaux ne produisent pas le produit d'intérêt, appelées périodes « improductives », permet de réduire la part des ressources alimentaires consommées par l'animal pendant ces phases. Vandehaar (1998) a par exemple simulé qu'une réduction de l'intervalle vêlage-vêlage, qu'un avancement de l'âge au 1^{er} vêlage ou qu'une augmentation du nombre de lactations permettaient des gains d'efficacité alimentaire du troupeau de l'ordre du pourcent. En élevage porcin, cette « improductivité » concerne surtout les pertes liées à la mortalité des porcelets et des porcs à l'engrais : une partie de la ressource alimentaire consommée par le troupeau n'est pas transformée en produit car certains animaux sont morts avant de pouvoir être « valorisés ». Une augmentation du taux de mortalité de 1% des porcelets ou porcs à l'engrais réduirait l'efficacité alimentaire du troupeau de l'ordre du pourcent et ce d'autant plus si la mortalité survient à une phase avancée de l'engraissement du porc (Gaines *et al.*, 2012). Selon ces auteurs, un taux de renouvellement plus faible (40 vs. 65%) est associé à un gain de 3% de l'efficacité alimentaire du troupeau : les cochettes, par comparaison avec les truies, ont des portées plus petites, un taux de mise bas plus faible et des portées avec un taux de survie plus faible à chaque phase d'engraissement des porcelets.

...en ajustant plus finement la ration offerte aux besoins individuels : l'alimentation de précision

Cette variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire indique notamment que la consommation individuelle n'est pas adaptée aux besoins de l'animal : les vaches inefficaces consomment plus que nécessaire pour couvrir leurs besoins. Intra-vache, bien que l'augmentation des quantités ingérées (QI) s'accompagne d'une augmentation de la production laitière de 0,90 kg de lait corrigé de la matière grasse par unité fourragère lait (UFL) ingérée, l'efficacité alimentaire diminue de 0,03 kg de lait 4% par UFL ingérée

(Figure 6). L'augmentation de consommation de ressources alimentaires fait donc naturellement baisser l'efficacité alimentaire de la vache. Une piste d'amélioration de l'efficacité alimentaire de l'animal envisagée est donc d'adapter plus finement la ration offerte aux besoins individuels, en passant d'une ration basée sur les besoins collectifs à une ration basée sur les besoins individuels. Par exemple chez le porc en croissance, la gestion de l'alimentation triphasée se base sur les besoins des porcs ayant les besoins les plus élevés. Cette gestion triphasée résulte en une suralimentation allant de 75 à 100% des porcs du troupeau selon la phase d'alimentation et le stade physiologique (Figure 7, Andretta *et al.*, 2014). L'alimentation de précision, basée sur la couverture des besoins individuels, permettra de réduire les gaspillages de ressources alimentaires sans pour autant perdre en production. Appliquée chez le porc, l'alimentation de précision montre une meilleure efficacité d'utilisation à la fois du phosphore et de l'azote. Les porcs alimentés d'après les besoins individuels ou alimentés par groupe de porcs ayant des besoins similaires ont une meilleure efficacité azotée et phosphorée par rapport aux porcs ayant une alimentation triphasée (Andretta *et al.*, 2014). Le facteur limitant de l'alimentation de précision reste les infrastructures nécessaires pour rendre l'alimentation individualisée accessible en ferme commerciale.

...par la sélection génomique et génétique directe sur l'efficacité alimentaire : possible chez d'autres espèces mais difficile chez la vache laitière.

La sélection génétique est un levier envisagé pour améliorer l'efficacité alimentaire en élevage parce qu'un troupeau constitué d'animaux plus efficaces est en théorie un troupeau plus efficace. Les premiers essais de sélection sur l'efficacité alimentaire chez la cochette confirment sa faisabilité. La 9^{ème} génération de sélection de lignée divergente pour l'efficacité alimentaire consomme moins d'aliments et est plus efficace que la génération 0 avec des différences d'écart-type génétique de 2,52 pour l'ingestion et de 3,84 pour l'efficacité alimentaire (Gilbert *et al.*, 2017). Les performances de croissance se sont maintenues pour la lignée des plus efficaces et légèrement accrues pour les moins efficaces, avec des différences significatives pour le gain moyen quotidien et non significatives pour l'épaisseur de gras sous-cutané.

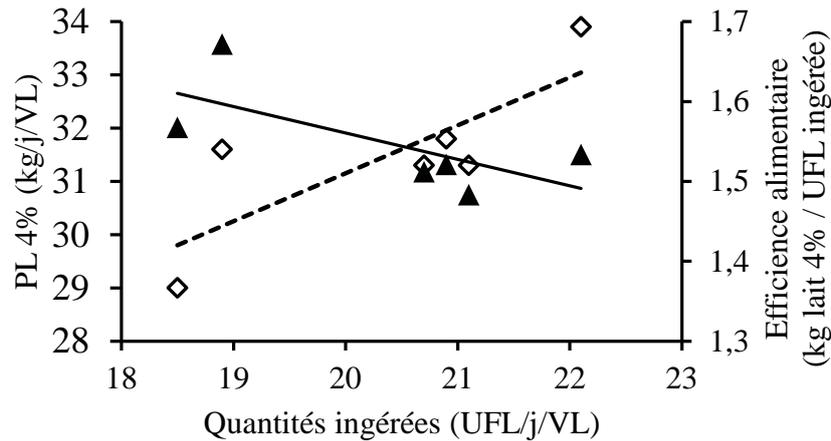


Figure 6 Evolution du lait corrigé de la matière grasse du lait (PL4%) et de l'efficacité alimentaire en fonction des quantités d'énergie nette ingérées (d'après Brun-Lafleur *et al.* 2010).

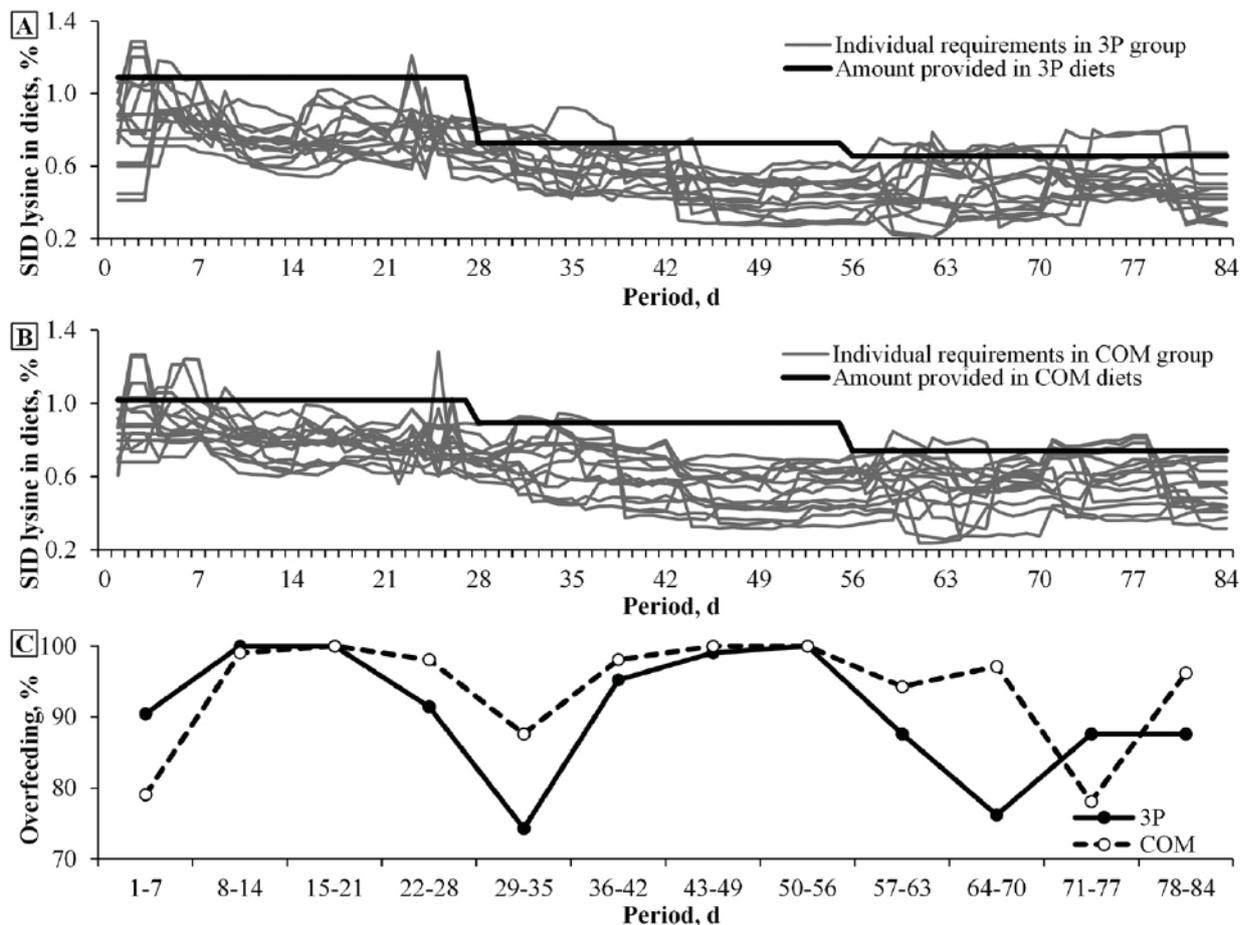


Figure 7 Relation entre les besoins estimés et les niveaux apportés en teneur en lysine digestible (digestibilité iléale standardisée, SID) de la ration pour une ration triphasée (3P, graphe A) et une ration commerciale (COM, graphe B) et le pourcentage d'animaux suralimentés associés à ces deux gestions d'alimentation (Andretta *et al.*, 2014).

Chez la vache laitière, Berry and Crowley (2013) estiment que la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire représente 5 à 10% de la moyenne des quantités ingérées. Les rares études de sélection des individus les plus efficaces se sont basées sur une sélection réalisée sur le veau (Macdonald *et al.*, 2014). L'hypothèse des auteurs était que des vaches identifiées comme efficaces ou inefficaces en tant que veau maintiendraient leur efficacité en tant que vache en lactation. Leurs résultats ne confirment pas cette hypothèse puisque si les groupes d'efficacité avaient été construits d'après l'efficacité de la vache et non du veau, les groupes ne contiendraient pas les mêmes individus. Les principaux freins au développement d'une sélection basée sur l'efficacité alimentaire chez la vache laitière sont d'une part la difficulté à constituer une population de référence et d'autre part l'héritabilité modérée de l'indicateur utilisé. La difficulté à constituer une population de référence, c'est-à-dire pour laquelle l'efficacité alimentaire est mesurée individuellement sur des animaux génotypés, réside dans la difficulté à mesurer les quantités individuelles d'aliments ingérés ainsi que l'ensemble des besoins de production dans des conditions homogènes (Veerkamp *et al.*, 2015). L'héritabilité de l'efficacité alimentaire est très variable et modérée selon les études chez la vache laitière, allant de 0 à 0,4 (Berry and Crowley, 2013). Une héritabilité de 0,2 - 0,3 peut être considérée comme suffisante, notamment si on compare avec un caractère inclus dans les indices de sélection, comme la production laitière dont l'héritabilité est autour 0,3 (Pryce *et al.*, 2015, Yao *et al.*, 2017). La population de référence nécessaire pour construire cette sélection avec une fiabilité de 50% devrait contenir plus de 100 000 individus pour un caractère ayant une héritabilité de 0,05 et environ 30 000 pour un caractère ayant une héritabilité de 0,3 (Gonzalez-Recio *et al.*, 2014). L'interprétation de ces héritabilités n'est valable que sous l'hypothèse que la variabilité interindividuelle phénotypique mesurée ne représente que de la variabilité phénotypique. La précision des prédictions génomiques de l'ingéré résiduel, l'indicateur souvent utilisé pour estimer les différences d'efficacité alimentaire, est sensible à la variabilité des environnements utilisés : la précision est plus grande quand la prédiction est réalisée au sein d'un même environnement qu'en utilisant une base plus large combinant des environnements différents (Yao *et al.*, 2017).

Objectifs de la thèse

L'avancée des travaux pour définir et mesurer l'efficacité alimentaire des animaux d'élevage est inégale avec une avancée plus importante pour les animaux en croissance que pour les femelles reproductrices, notamment les vaches laitières (Figure 8). Contrairement aux animaux en croissance, les femelles reproductrices et en production se caractérisent par une suite de phases physiologiques, chacune caractéristique d'un niveau d'interaction différent entre la santé et les fonctions de croissance, reproduction et lactation. Restreindre l'efficacité alimentaire à la confrontation entre les aliments consommés et le produit réalisé est par conséquent dangereux.

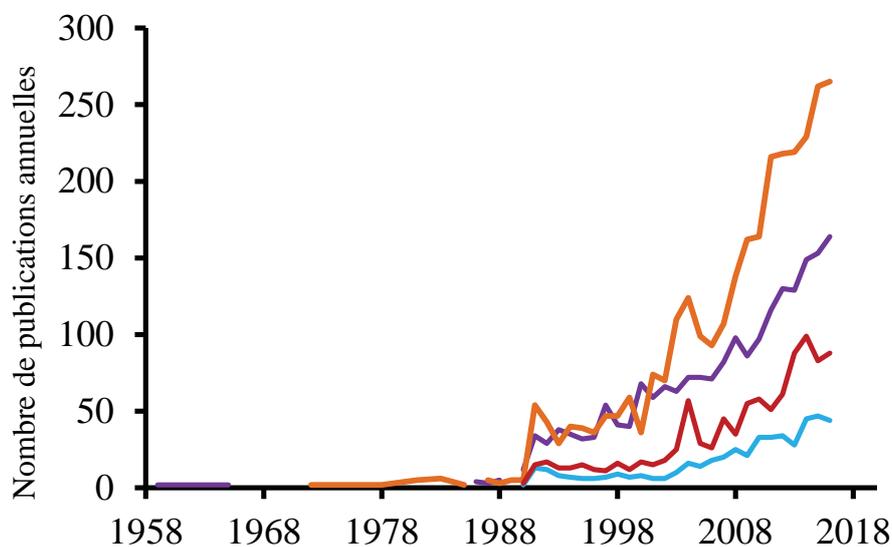


Figure 8 Nombre de publications annuelles sur l'efficacité alimentaire chez le porc (—), la volaille (—), les bovins viande (—) et la vache laitière (—).

Ces données sont issues d'un « citation report » sur les données ©2017 Thomson Reuters Web of science core collection™ consultées le 12/01/2017 pour une requête combinant des synonymes de « feed efficiency » et le nom de l'espèce animale considérée : dairy cow, pig, broiler, beef or suckler cattle.

Parmi les femelles reproductrices, la vache laitière a des caractéristiques qui soulèvent de nouvelles questions. La place de la mobilisation et de la reconstitution des réserves corporelles se pose chez la vache laitière parce que les réserves corporelles sont à la fois à considérer comme un apport énergétique important en début de lactation, donc comme une ressource dans le cadre de l'efficacité alimentaire, et comme un produit réalisé important en milieu et fin de lactation. L'état et la variation des réserves corporelles peuvent conditionner les performances de production et de reproduction de la vache. Une autre question posée relève de la difficulté à définir la période de mesure, notamment soulevée à cause de la

longévité de la vache et de la longueur des phases de lactation, entrecoupées par des phases de tarissement.

Ce projet vise à étudier la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire des vaches laitières, d'une part en définissant une méthodologie pour l'estimer et d'autre part en identifiant des caractères biologiques associés à cette variabilité. Pour définir la stratégie adoptée pour atteindre cet objectif (Chapitre 2), un état des lieux bibliographique est réalisé dans le Chapitre 1 pour identifier les verrous méthodologiques afin d'estimer la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire et les facteurs déjà identifiés comme associés à l'efficacité alimentaire chez la vache laitière ou chez d'autres espèces.

Références

- Andretta I, Pomar C, Rivest J, Pomar J, Lovatto PA and Radünz Neto J 2014. The impact of feeding growing–finishing pigs with daily tailored diets using precision feeding techniques on animal performance, nutrient utilization, and body and carcass composition. *Journal of Animal Science* 92, 3925-3936.
- Berry DP and Crowley JJ 2013. CELL BIOLOGY SYMPOSIUM: Genetics of feed efficiency in dairy and beef cattle. *Journal of Animal Science* 91, 1594-1613.
- Brun-Lafleur L, Delaby L, Husson F and Faverdin P 2010. Predicting energy x protein interaction on milk yield and milk composition in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 93, 4128-4143.
- Devun J and Guinot C 2012. Alimentation des bovins: rations moyennes et autonomie alimentaire. L'institut de l'Élevage, Paris, France.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2016. FAOSTAT. (FAO). Available on <http://www.fao.org/faostat/en/#home> (Accessed on 10/01/2017).
- Gaines AM, Peterson BA and Mendoza OF 2012. Herd management factors that influence whole herd feed. In *Feed efficiency in swine* (ed. JF Patience), pp. 15-39, Wageningen, The Netherlands, Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
- Gilbert H, Billon Y, Brossard L, Faure J, Gatellier P, Gondret F, Labussière E, Lebreton B, Lefaucheur L, Le Floch N, Louveau I, Merlot E, Meunier-Salaün MC, Montagne L, Mormede P, Renaudeau D, Riquet J, Rogel-Gaillard C, van Milgen J, Vincent A and Noblet J 2017. Review: divergent selection for residual feed intake in the growing pig. *Animal*, 1-13.doi: <http://dx.doi.org/10.1017/s175173111600286x>
- Gill M 2013. Converting feed into human food: the multiple dimensions of efficiency. In *Proceedings of the FAO Symposium: optimization of feed use efficiency in ruminant production systems, 27/11/2012, Bangkok, Thailand* (eds. HPS Makkar and D Beaver), pp. 1-13.
- Gonzalez-Recio O, Coffey MP and Pryce JE 2014. On the value of the phenotypes in the genomic era. *Journal of Dairy Science* 97, 7905-7915.

- INOSYS réseaux d'élevage (INOSYS) 2017. Observatoire INOSYS Réseaux d'élevage. (Institut de l'élevage & Chambre d'agriculture et territoires). Available on [http://idele.fr/services/outils/observatoire-inosys-reseaux-delevage.html?tx_ideleinosys_inosys\[action\]=filier&tx_ideleinosys_inosys\[controller\]=Inosys&cHash=ee324bb3411fc5d039bb3b4a525eac24](http://idele.fr/services/outils/observatoire-inosys-reseaux-delevage.html?tx_ideleinosys_inosys[action]=filier&tx_ideleinosys_inosys[controller]=Inosys&cHash=ee324bb3411fc5d039bb3b4a525eac24) (Accessed on 12/01/2017).
- Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) 2016. Indice des prix agricoles à la production (IPPAP) - base 2010. (INSEE). Available on <https://www.bdm.insee.fr/bdm2/choixCriteres?codeGroupe=1465> (Accessed on 20/12/2016).
- Laisse S, Rouillé B, Baumont R and Peyraud JL 2016. Evaluation de la contribution nette des systèmes bovins laitiers français à l'approvisionnement alimentaire protéique pour l'être humain. In 23ème Journées Rencontres Recherches Ruminants, 07-08/12/2016, Paris, France, pp. 263-266.
- Macdonald KA, Pryce JE, Spelman RJ, Davis SR, Wales WJ, Waghorn GC, Williams YJ, II, Maret LC and Hayes BJ 2014. Holstein-Friesian calves selected for divergence in residual feed intake during growth exhibited significant but reduced residual feed intake divergence in their first lactation. *Journal of Dairy Science* 97, 1427-1435.
- McNeill DM 2013. Forages for ruminants, cereals for human food and fuel. In *Proceedings of the FAO Symposium: optimization of feed use efficiency in ruminant production systems, 27/11/2012, Bangkok, Thailand* (eds. HPS Makkar and D Beaver), pp. 15-32.
- Pryce JE, Gonzalez-Recio O, Nieuwhof G, Wales WJ, Coffey MP, Hayes BJ and Goddard ME 2015. Hot topic: Definition and implementation of a breeding value for feed efficiency in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 98, 7340-7350.
- Rastoin JL and Gherzi G 2010. *Le système alimentaire mondial: concepts et méthodes, analyses et dynamiques*. Editions Quae, Paris, France.
- Rémond D 2014. Protéines animales-protéines végétales quel équilibre pour une alimentation durable? Presented at *Les Journées Francophones de Nutrition, 10-12/12/2014, Bruxelles, Belgique*.
- Robinson T and Pozzi F 2011. *Mapping supply and demand for animal-source foods to 2030*. FAO, Rome, Italy.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division. 2015. *World population prospects: the 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables*. Working Paper No. ESA/P/WP.241. Available on: http://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/Key_Findings_WPP_2015.pdf (Accessed on 19/12/2016).
- Van Vuuren DP, Ochola O and Riha S 2009. Outlook on agricultural change and its drivers. In *Agriculture at a crossroads- Global report* (eds. BD McIntyre, HR Herren, J Wakhungu and RT Watson), pp. 255-305, *International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (IAASTD)*, Washington, USA.

- Vandehaar MJ 1998. Efficiency of nutrient use and relationship to profitability on dairy farms. *Journal of Dairy Science* 81, 272-282.
- Vandehaar MJ, Armentano LE, Weigel K, Spurlock DM, Tempelman RJ and Veerkamp R 2016. Harnessing the genetics of the modern dairy cow to continue improvements in feed efficiency. *Journal of Dairy Science* 99, 4941-4954.
- Veerkamp RF, De Haas Y, Pryce JE, Coffey MP, Spurlock DM and Vandehaar MJ 2015. Guidelines to measure individual feed intake of dairy cows for genomic and genetic evaluations. In *Proceedings of the ICAR Technical Meeting, 10-12/06/2015, Krakow, Poland*, pp. 191-198.
- Wilkinson JM 2011. Re-defining efficiency of feed use by livestock. *Animal* 5, 1014-1022.
- Yao C, de los Campos G, Vandehaar MJ, Spurlock DM, Armentano LE, Coffey M, de Haas Y, Veerkamp RF, Staples CR, Connor EE, Wang Z, Hanigan MD, Tempelman RJ and Weigel KA 2017. Use of genotype x environment interaction model to accommodate genetic heterogeneity for residual feed intake, dry matter intake, net energy in milk, and metabolic body weight in dairy cattle. *Journal of dairy science* 100, 2007-2016.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

L'objectif de ce chapitre est de réaliser un état des lieux d'une part des verrous méthodologiques pour estimer la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire et d'autre part des caractères biologiques associés à la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire. L'étude de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire est plus avancée pour les espèces en croissance telles que le porc, la volaille ou les jeunes bovins. En complément des premiers travaux sur vaches laitières, la synthèse bibliographique regroupe les travaux réalisés chez le porc en croissance, la truie et les jeunes bovins, pour bénéficier de l'expérience des travaux plus avancés dans ces espèces.

Les résultats de cette synthèse visent à mieux définir la stratégie à adopter (Chapitre 2) pour répondre à la question de recherche posée dans l'introduction générale : mieux comprendre la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire de la vache laitière. A cet effet, la synthèse est découpée en trois parties qui concernent : 1/ la difficulté à définir l'efficacité alimentaire de façon homogène, 2/ l'hétérogénéité de l'estimation de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire et 3/ l'identification de mécanismes biologiques associés à la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire.

I. L'efficacité alimentaire : un concept qui n'a pas de définition biologique homogène

Quelle que soit l'espèce considérée, la première difficulté repose sur la définition et par conséquent le calcul de l'efficacité alimentaire. Contrairement à des indicateurs classiques tels que la production laitière, le poids vif, la note d'état corporel ou le taux de re-vêlage, l'efficacité alimentaire est plutôt à considérer comme un indicateur synthétique de plusieurs caractères, incluant à la fois les ressources et produits. La difficulté est d'obtenir un consensus de ce que chacun attend vis-à-vis de l'efficacité alimentaire.

a. Une pluralité de définitions des composantes biologiques à inclure dans les ressources et les produits pour estimer l'efficacité, surtout pour les femelles reproductrices productrices

Pour définir l'efficacité alimentaire, il faut d'un côté définir quelles sont les ressources alimentaires mobilisées pour réaliser les produits et de l'autre, définir quels sont les produits réalisés à partir des ressources mobilisées. La définition des ressources et des produits à prendre en compte va surtout dépendre du stade physiologique et des fonctions biologiques intervenant à chaque stade. Les femelles reproductrices et productrices connaissent des phases physiologiques successives régulées par différentes fonctions : entretien, croissance, reproduction, gestation et lactation ou ponte. A l'opposé, les animaux en croissance ou à l'engrais ne connaissent qu'une seule phase physiologique combinant croissance et entretien¹. Néanmoins, la question de l'efficacité des femelles destinées à produire les animaux en croissance doit aussi faire partie des questions à aborder pour avoir une vision globale des résultats à obtenir.

Définition des ressources et produits.

La définition des ressources et produits à prendre en compte dans l'estimation de l'efficacité est beaucoup plus variable pour les femelles reproductrices, telles que la poule pondeuse, la truie ou la vache laitière, que pour les animaux en croissance tels que le porc, l'agneau, le poulet de chair, le poisson ou le jeune bovin (Tableau 1). Pour les espèces en croissance, les ressources sont définies comme les quantités d'aliments ingérées, exprimées en kg de matière sèche et les produits sont définis comme le gain de poids et une estimation des besoins pour l'entretien (Tableau 1). Pour les femelles reproductrices, l'estimation de l'efficacité alimentaire est plus compliquée, car en plus de produire du lait, de la viande ou des œufs, elles doivent se reproduire

¹ L'entretien est défini comme le besoin énergétique de l'animal associé à la dépense d'énergie pour le métabolisme basal et pour conserver sa masse corporelle en quantité et qualité (INRA, 2010).

Tableau 1 Comparaison de la définition des ressources et produits utilisés pour estimer l'efficacité alimentaire dans la bibliographie pour différentes espèces animales.

Réf. ¹	Espèces	Ressources	Produits	Type d'article
1	veaux	MSI	gain PV	original
2	poisson	MSI	GMQ	original
3	veaux	MSI	PVM + variation PV	original
4	volaille	MSI	(GMQ or gain de PV) + (PVM or PV initial)	synthèse
5	volaille	MSI	PVM + gain PV	original
6	jeunes bovins	MSI	PV + GMQ + GMQ + épaisseur gras sous-cutané	original
7	jeunes bovins	MSI	GMQ + PVM (+gain protéines + gras)	synthèse
8	agneau	MSI	GMQ + PVM	original
9	volaille	MSI	GMQ + PVM	original
10	jeunes bovins	MSI	GMQ + PVM	original
11	truies	EM ingérée + EM mobilisée + besoin d'entretien+PV	EM gagnée réserves corporelles des porcelets + PV porcelets + entretien porcelets	original
12	poule pondeuse	MSI	PVM + PV oeuf + gain PV	original
13	truies	MSI	entretien truie + croissance portée + perte PV truie + perte gras sous-cutané truie	original

MSI = matière sèche ingérée; EM = énergie métabolisable; PV = poids vif; GMQ = gain moyen quotidien; PVM = poids vif métabolique

¹1 = Koch *et al.* (1963) ; 2 = Grima *et al.* (2008) ; 3 = Pryce *et al.* (2012) ; 4 = Willems *et al.* (2013) ; 5 = Aggrey and Rekaya (2013) ; 6 = Savietto *et al.* (2014) ; 7 = Berry and Crowley (2013) ; 8 = Rajaei Sharifabadi *et al.* (2016) ; 9 = Xu *et al.* (2016) ; 10 = Pereira *et al.* (2016) ; 11 = Bergsma *et al.* (2009) ; 12 = Yuan *et al.* (2015) ; 13 = Young *et al.* (2016).

Tableau 2 Description des modèles utilisés chez la vache laitière dans la bibliographie pour estimer l'efficacité alimentaire d'après : les méthodes de mesure des quantités ingérées (QI), les produits, les facteurs fixes du modèle, la ration, l'effectif étudié, la durée de la période de lactation étudiée, la nature du modèle, le coefficient de détermination du modèle (R²) et l'absence (ND) ou la présence (oui) de la publication des coefficients de la régression (Coeff.).

Ref. ¹	QI	Produits			Facteur	Ration	Effectif	Période (JdL)	Modèle		
		Lait	Entretien	Réserves corporelles: <u>Etat</u> Variations					Model	R ²	Coeff.
1	EM	PL, MG, MP, lactose	PV	ΔPV		2 TMR	204	1-182	Reg.	ND	ND
1	EM	EM lait	EMentretien			2 TMR	204	1-182	Syst. Alim	NA	ND
2	MSi	MG, MP, lactose	PVM	ΔPV- ΔPV+	année	pât.+conc.	175	16-288	Reg.	0,86	ND
3	MSi	PL, MG, MP	PV	ΔNEC- ΔNEC+	stade lactation	MR+conc.	970	305	Reg.	0,73	ND
4	EM	EM lait	PV	ΔPV- ΔPV+		MR + conc.	145	1-210	Reg.	0,90	ND
4	EM	EM lait	EMentretien			MR + conc.	145	1-210	Syst. Alim	NA	ND
5	EM	PL corrigée MG		ΔPV	parité	TMR	287	1-90	Reg.	0,72	oui
6	EN	EN lait	PVM	ΔPVV		3 TMR	281	5-305	Reg.	0,68	ND
7	MSi	PL, MG, MP, lactose	PVM	ΔPV		TMR	197	(61/191)+32	Reg.	0,43	oui
8	MSi	PL, MG, MP, lactose	PVM	<u>NEC</u> ΔPV		TMR	183	35	Reg.	0,60	ND
8	MSi	PL, MG, MP, lactose	PVM	<u>NEC</u> ΔPV		TMR	183	35	Syst. Alim	NA	ND
9	MSi	EN lait	PVM	ΔPV	parité, stade lactation, ration, expérience	185 rations	4893	50-200	Reg.	ND	oui
10	EN	EN lait	PVM	ΔPVV		3 TMR	260	5-305	Reg.	0,73	ND
11	EN	EN lait	PVM	<u>NEC</u> ΔPV- ΔPV+	parité	pât. + conc.	1412	1-305	Reg.	0,59	oui
12	MSi	PL corrigée MG	PVM	ΔNEC- ΔNEC+	stade lactation	TMR	84	ND	Reg.	0,85	oui
13	MSi	EN lait	PVM	ΔPV	stade lactation	185 rations	3656	50-200	Reg.	ND	ND
					parité, stade lactation, troupeau, année, saison vèlage						

¹1 = Veerkamp *et al.* (1995); 2 = Coleman *et al.* (2010); 3 = Vallimont *et al.* (2011); 4 = Mantysaari *et al.* (2012); 5 = Connor *et al.* (2013); 6 = Manafiazar *et al.* (2013); 7 = Davis *et al.* (2014); 8 = Macdonald *et al.* (2014); 9 = Tempelman *et al.* (2015); 10 = Manafiazar *et al.* (2016); 11 = Hurley *et al.* (2016); 12 = Xi *et al.* (2016); 13 = Yao *et al.* (2016); 13 = Yao *et al.* (2017). NA = non adapté; ND = pas de données renseignées; Reg. = modèle de régression linéaire; EN = énergie nette; EM = énergie métabolisable; MSI = matière sèche ingérée; PL = production laitière; MP = matière protéique du lait; MG = matière grasse du lait; PV = poids vif; NEC = note d'état corporel; = perte de PV; gain de PV; perte de NEC; gain de NEC; TMR = ration complète; MR = ration semi-complète; conc. = concentrés; pât. = pâturage; Syst. Alim. = système alimentaire; JdL = jour de lactation.

et cumulent des phases physiologiques différentes au cours de leur vie, combinant différents besoins : croissance, gestation, lactation ou ponte et entretien. Les ressources et produits sont donc plus compliqués à définir pour ces femelles. Les ressources comprennent les quantités d'aliments ingérées et l'ensemble des produits comprennent les dépenses associées à l'entretien, exprimées par le poids vif métabolique ou le poids vif (**PV**), et à la production caractéristique de l'espèce : dépense pour la synthèse de lait, d'œufs ou croissance des porcelets (Tableau 1). A cette définition de base des ressources s'ajoutent des variantes, notamment chez la truie et surtout chez la vache laitière, avec l'ajout des ressources mobilisées dans les réserves corporelles et des dépenses associées au besoin d'entretien (Young *et al.*, 2016, Hurley *et al.*, 2016). La définition des ressources diffère aussi sur l'unité de mesure utilisée, allant du kilogramme de matière sèche ingérée à l'énergie nette ingérée² (Tableau 1). Cette question du choix de l'unité de mesure est importante et discutée dans le paragraphe suivant. A la définition des produits s'ajoutent également des variantes (Tableau 1), avec l'ajout des dépenses associées au gain ou la perte de réserves corporelles ou des dépenses associées au changement de position.

Importance de l'unité de mesure des aliments consommés.

Les ressources peuvent être exprimées dans différentes unités, reflétant chacune l'énergie ou les protéines à différentes étapes de la digestion, depuis leur forme brute lors de l'ingestion jusqu'à leur forme métabolisable. Pour l'énergie, ces étapes vont de l'énergie brute à l'énergie nette. L'énergie nette représente l'énergie brute corrigée des pertes dans les fèces (énergie digestible), sous forme d'urée et de gaz (énergie métabolisable) et sous forme d'extra-chaueur. Chez la vache laitière, les ressources sont souvent exprimées en matière sèche (**MS**) ingérées, énergie métabolisable ou énergie nette ingérée (Tableau 2). Cette question du choix de l'unité de mesure des ressources consommées est plus critique pour les ruminants que pour les monogastriques. L'élevage de ruminants est caractérisé par des types de ration plus variables qu'en élevage de monogastriques, notamment expliqués par la possibilité de valoriser des ressources cellulosiques qui sont moins énergétiques mais qui entrent peu en compétition avec d'autres usages alimentaires. Pour les ruminants adultes, la majorité de la ration est constituée de fourrages, à hauteur de 78% en moyenne pour les élevages bovins laitiers français (Devun and Guinot, 2012). Leur valeur alimentaire varie en fonction des conditions climatiques et de la nature du fourrage. Cette diversité de composition et de valeur alimentaire des rations en élevage de

² L'énergie nette ingérée correspond à l'énergie des productions de l'animal, soit sous forme d'entretien, soit sous forme de dépôt tissus ou de produit tels que le lait, l'œuf ou les porcelets. C'est donc l'énergie brute de l'aliment corrigée pour les pertes associées à la digestion et aux fermentations et au métabolisme de l'organisme.

ruminants soulève la question de la constance de l'efficacité alimentaire inter-régimes (Macdonald *et al.*, 2014, Connor, 2015).

Effet de différentes définitions des ressources et produits.

Le risque de cette diversité de définition de l'efficacité alimentaire est de ne pas pouvoir comparer les efficacités obtenues entre elles, car elles ne mesurent pas la même chose. Chez la vache laitière par exemple pour une même définition des produits, la corrélation entre les efficacités calculées avec des ressources uniquement définies à partir des quantités ingérées ou incluant aussi les dépenses associées à l'entretien n'est que de 0,89 (Hurley *et al.*, 2016). Pour une définition similaire des ressources, la corrélation entre les efficacités calculées avec des produits incluant uniquement l'entretien ou uniquement les besoins de lactation n'est que de 0,10 (Hurley *et al.*, 2016). De la même manière, la corrélation entre les efficacités calculées avec des produits incluant à la fois les besoins de lactation et les besoins associés aux variations de réserves corporelles ou uniquement les besoins de lactation n'est que de 0,65 (Hurley *et al.*, 2016). Ces résultats montrent que les définitions à la fois des ressources et des produits vont fortement influencer l'identification des animaux efficaces ou inefficaces.

b. La place des variations de réserves corporelles dans l'estimation de l'efficacité alimentaire chez les femelles fortes productrices

Importance des réserves corporelles dans le métabolisme de la vache laitière.

La place des réserves corporelles dans l'efficacité alimentaire est une question importante chez les femelles hautes productrices, telles que la truie ou la vache laitière, parce que les réserves corporelles jouent un rôle important dans la gestion des écarts entre apports et productions (Garnsworthy, 1988). Le débat est d'autant plus important que la non prise en compte de la perte de réserves corporelles de début de lactation dans l'estimation de l'efficacité alimentaire est associée à des vaches (Vallimont *et al.*, 2011) ou des truies (Dekkers and Gilbert, 2010) efficaces qui mobilisent plus durant la lactation comparées aux moins efficaces (Figure 1). Ces résultats sont d'autant plus inquiétants que l'état et la variation des réserves corporelles interagissent avec la fonction de reproduction et sont à l'origine de troubles métaboliques (Roche *et al.*, 2009). Des vaches trop grasses au vêlage ou mobilisant fortement leurs réserves corporelles en début de lactation sont des vaches qui ont un risque accru d'acétonémie en début de lactation (Gillund *et al.*, 2001) ou d'autres troubles métaboliques (Roche *et al.*, 2009). Des vaches trop maigres ou trop grasses ou mobilisant trop leurs réserves en début de lactation sont souvent des vaches ayant une reprise d'activité lutéale plus tardive (Bastin and Gengler, 2013),

une mise à la reproduction plus tardive (Buckley *et al.*, 2003, Gillund *et al.*, 2001) et un taux de gestation plus faible (Buckley *et al.*, 2003, Roche *et al.*, 2007). Pour éviter ces effets indésirables associés à la mobilisation des réserves corporelles en début de lactation, l'état et la variation d'état des réserves corporelles doivent être mesurés et pris en compte dans l'estimation de l'efficacité alimentaire.

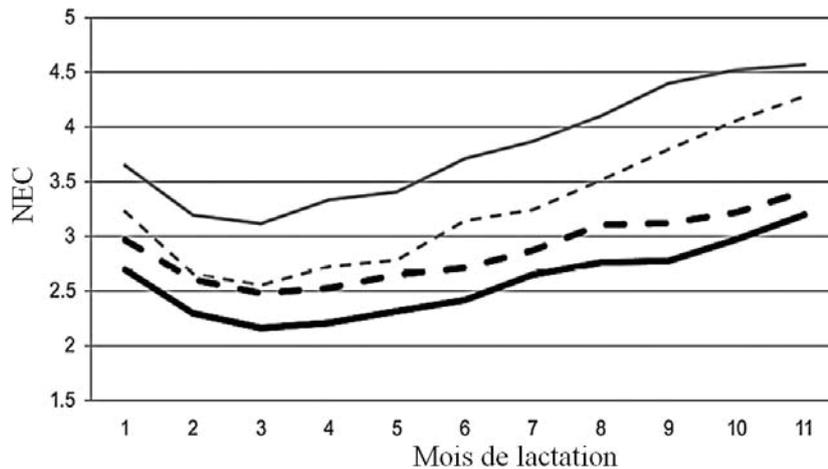


Figure 1 Effet de la prise en compte de la perte de note d'état corporel sur les 60 premiers jours de lactation dans l'identification des vaches les 10% les plus efficaces (97 vaches ; avec - - - et sans —) et les 10% les moins efficaces (97 vaches ; avec et sans —) sur la différence de cinétique de note d'état corporel (NEC, graphique adapté de Vallimont *et al.*, 2011).

L'état et la variation d'état des réserves corporelles restent difficilement accessibles à haut débit et avec précision.

Une multitude de méthodes de mesure d'état des réserves corporelles existe, soit par mesure directe passant par la composition de la carcasse, soit par mesure indirecte. La méthode directe implique l'abattage des animaux pour disséquer la carcasse et mesurer la composition corporelle en lipides (Robelin *et al.*, 1982, Szabo *et al.*, 1999). Ce gold standard n'est pas utilisable pour de gros effectifs et ne permet pas de réaliser des mesures répétées sur le même animal. Les méthodes indirectes ont été calibrées sur ce gold standard. Parmi ces méthodes indirectes, certaines sont précises mais invasives pour l'animal et chronophages, telles que l'estimation de la teneur en lipides corporels via la mesure du diamètre des adipocytes ou la technique de l'eau lourde (Waltner *et al.*, 1994). Les méthodes par imagerie pour estimer l'épaisseur de gras ou muscle sous-cutané par échographie (Staub *et al.*, 2016, Schröder and Staufenbiel, 2006) sont plus accessibles, mais restent chronophages et sont moyennement répétables (Brethour, 1992). Actuellement en élevage, l'état et la variation des réserves corporelles sont estimés soit par le poids vif, soit par la notation d'état corporel. Cette notation reste en élevage la méthode de

référence parce qu'elle est simple, non invasive et peu coûteuse. Le poids vif est aujourd'hui mesurable à haut débit, car sa mesure est automatisée. Cependant sa variation cache également des variations de contenus digestifs et de gabarit de l'animal. Chez la vache laitière les variations de poids vif sont d'autant plus compliquées à interpréter que la part de chacune de ses composantes évolue au cours de la lactation (Chilliard *et al.*, 1983). La notation d'état corporel est réalisée soit visuellement, soit par palpation de zones anatomiques de référence d'après une grille de notation (définie de 0 à 5 par Bazin (1984) pour la grille française) pour laquelle une note d'état corporel (**NEC**) faible représente une vache maigre alors qu'une NEC élevée représente une vache grasse. La NEC est trop subjective pour apporter le niveau de précision requis pour une étude des variations interindividuelles. La diversité des grilles de notation définies à l'échelle mondiale rend la NEC difficilement comparable inter-pays intra-race avec des corrélations allant de 0,73 entre la grille américaine et néozélandaise à 0,85 entre la grille irlandaise et néozélandaise (Roche *et al.*, 2004). Des méthodes basées sur l'imagerie bidimensionnelle ou tridimensionnelle (**3D**) émergent pour estimer automatiquement et donc plus objectivement la NEC de la vache laitière (Azzaro *et al.*, 2011, Bercovich *et al.*, 2013, Bewley *et al.*, 2008). Ces méthodes d'imagerie manquent pour l'instant de répétabilité et de précision pour être utilisées en routine mais montrent un potentiel intéressant notamment pour des mesures à haut débit de la NEC chez la vache laitière.

II. Une estimation de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire dont la méthodologie n'est pas encore standardisée³

a. Trois types d'indicateur pour estimer l'efficacité alimentaire et sa variabilité interindividuelle

Définition des trois indicateurs.

L'efficacité alimentaire est aujourd'hui couramment estimée par 2 types d'indicateur (Berry and Crowley, 2013, Patience *et al.*, 2015): un ratio entre les productions réalisées et les quantités d'aliments consommées, appelé Efficacité de Conversion Alimentaire (ECA ou FCR en anglais), et l'indicateur appelé ingéré résiduel (**IR**). Un animal est d'autant plus efficace qu'il produit plus par unité de quantité d'aliments ingérés (**QI**), donc que son ECA est grand. L'IR a été défini par Koch *et al.* (1963) comme la consommation alimentaire corrigée de la consommation associée aux principaux besoins de l'animal : entretien, croissance et production laitière pour la vache laitière. Un animal est considéré comme efficace s'il ingère moins de ressources alimentaires qu'attendues, i.e. son IR est négatif. A l'inverse un animal sera considéré comme inefficace pour un IR positif (Figure 2). L'unité utilisée pour estimer les QI est primordiale, car elle va conditionner la définition de l'efficacité alimentaire (cf. 1.a). Quand les QI sont exprimées en matière sèche ingérée, l'IR est souvent appelé **RFI** pour residual feed intake (consommation alimentaire résiduelle) et quand les QI sont exprimées en énergie métabolisable ou nette, l'IR est plutôt appelé **REI** pour residual energy intake. L'estimation de la consommation alimentaire attendue pour couvrir les besoins de l'animal peut se faire de deux manières (Berry and Crowley, 2013): soit en estimant ces besoins avec les équations des systèmes alimentaires (NRC (2001) pour les USA ou INRA (2010) pour la France), soit en utilisant des variables indirectes pour estimer ces besoins. Le premier cas représente en fait le bilan énergétique alimentaire (**BE**). Ce BE est souvent corrigé (**BEc**) pour les variations de réserves corporelles pour tenir compte des variations de quantités ingérées associées aux variations de réserves corporelles. Dans le second cas, un modèle, généralement de régression linéaire des quantités ingérées, est ajusté sur les variables communément utilisées pour refléter les besoins de production, croissance et d'entretien. Pour la vache laitière, les besoins de production laitière sont souvent représentés par le volume et la composition du lait, les besoins d'entretien sont souvent représentés par le poids vif métabolique et les besoins associés à la

³ Cette partie a fait l'objet d'une communication orale :

Fischer A, Jurquet J, Lamy JM and Faverdin P 2016. L'efficacité alimentaire de la vache laitière: un concept mais quelle définition? In Biennales des stations expérimentales professionnelles laitières du grand Ouest, 2ème édition, 02/02/2016, Rennes, France, pp. 70-82.

croissance sont souvent représentés par la variation de poids vif ou l'âge. L'inconvénient majeur de cette diversité d'indicateurs est qu'ils ne sont que modérément corrélés entre eux, avec tout de même une forte corrélation observée entre les deux indicateurs BE et RFI. La corrélation entre l'ECA et les indicateurs type RFI est négative et varie entre -0,53 et -0,57 avec RFI (Vallimont *et al.*, 2011, Hurley *et al.*, 2016) et entre -0,80 et -0,96 avec le BE (Hurley *et al.*, 2016, Mantysaari *et al.*, 2012) alors que la corrélation entre le RFI et le BEc est positive et forte, entre 0,81 et 0,89 (Hurley *et al.*, 2016, Mantysaari *et al.*, 2012). L'efficacité estimée dans les trois cas n'est donc pas la même.

Avantages et inconvénients de chacun des indicateurs utilisés pour estimer la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire.

Quel que soit le type d'indicateur présenté précédemment, l'inconvénient majeur commun aux trois reste la nécessité d'avoir des mesures de quantités ingérées individuelles (Veerkamp *et al.*, 2015). Cette donnée n'est aujourd'hui accessible qu'avec des dispositifs onéreux et lourds à installer et à entretenir, tels que les auges peseuses accessibles par plusieurs animaux ou les auges individuelles nécessitant la pesée des quantités d'aliments offertes et refusées. Parce que les quantités d'aliments ingérées ne sont accessibles que dans certaines installations expérimentales équipées, l'estimation de l'efficacité alimentaire n'est mesurable que dans un nombre limité de situations. Un second inconvénient commun aux indicateurs ECA et IR est que leur interprétation n'est valable que pour la population d'étude et ils ne sont donc pas comparables entre études.

La simplicité de l'indicateur type ratio en fait l'indicateur privilégié pour communiquer au sein de la filière laitière (Chanteloube *et al.*, 2015), mais l'indicateur type IR est plus complet et adapté pour réaliser une sélection génétique et génomique. L'ECA s'interprète facilement : un ratio plus grand est synonyme d'une production plus grande par unité d'aliment ingéré, donc d'une efficacité plus grande. L'inconvénient majeur de cet indicateur est qu'il est fortement corrélé à ses composantes (Berry and Crowley, 2013). En effet, l'ECA est positivement corrélé avec les variables de production laitière avec des corrélations allant de 0,67 (Hurley *et al.*, 2016) à 0,87 (Vallimont *et al.*, 2011). De la même manière, quand le poids vif métabolique et les variations de poids vif sont inclus, l'ECA est négativement corrélé au poids vif métabolique et aux variations de poids vif avec des corrélations de 0,23 pour le poids métabolique et -0,36 pour les variations de poids vif (Hurley *et al.*, 2016). Le deuxième inconvénient de l'indicateur « ratio » est qu'il est fortement corrélé aux variations de réserves corporelles, même quand elles ne sont pas incluses dans le calcul du ratio, avec des corrélations allant de -0,15 à -0,50 selon la

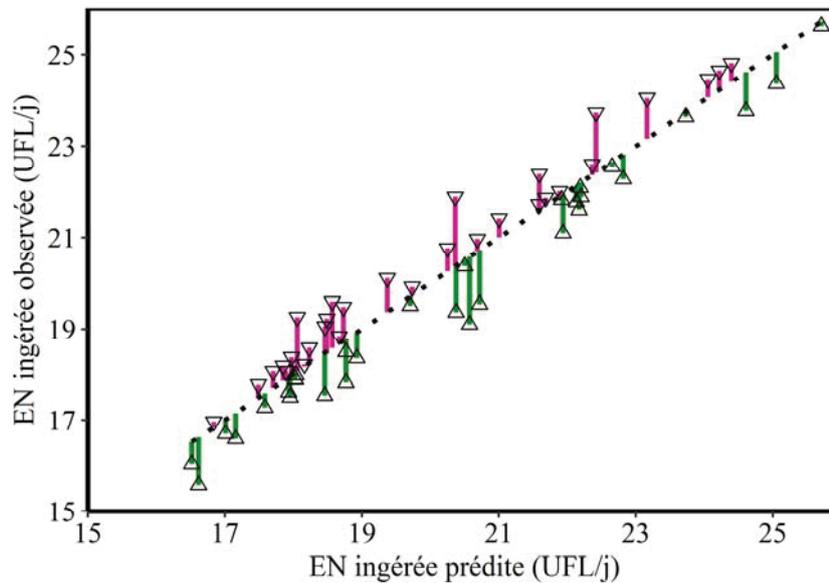


Figure 2 Régression linéaire (.....) de l'énergie nette (EN) ingérée observée en fonction de l'EN ingérée prédite d'après les principaux besoins énergétiques de la vache laitière : synthèse du lait, entretien, variations des réserves corporelles. La différence entre l'EN ingérée observée et l'EN ingérée prédite (—) définit le residual energy intake (REI). Une différence positive (—), i.e. un REI positif, est associée à une vache inefficace (▼), car elle ingère plus que prévu. Une différence négative (—), i.e. un REI négatif, est associée à une vache efficace (▲), car elle ingère moins que prévu.

définition du ratio (Hurley *et al.*, 2016). Une sélection basée sur cet indicateur pour des vaches laitières risquerait donc de favoriser l'amaigrissement des animaux. De plus, cette sélection serait redondante, car elle sélectionnerait en partie sur la production laitière qui est déjà incluse dans les indices de sélection. L'interprétation de l'ECA est complexe, car l'origine de sa variabilité interindividuelle peut à la fois venir du numérateur, du dénominateur, de la combinaison des deux ou de caractères zootechniques non pris en compte. Cette incapacité à prédire les réponses de sélection fait du ratio un indicateur inadapté pour comprendre l'efficacité alimentaire et inadapté pour la sélection génétique et génomique (Berry and Crowley, 2013).

L'indicateur type IR présente l'avantage d'être plus complet parce qu'il est indépendant des caractères zootechniques inclus dans le modèle, notamment de l'ensemble des besoins de production et des fonctions biologiques qui justifient un besoin énergétique pertinent au regard du chercheur. Les corrélations entre les indicateurs type IR et l'ensemble des variables incluses dans le modèle sont nulles ou proche de 0 (Hurley *et al.*, 2016, Liinamo *et al.*, 2015, Mantysaari *et al.*, 2012). Cette indépendance vis-à-vis des caractères inclus dans le modèle en fait un caractère intéressant dans une optique de sélection génétique. La contrepartie est la lourdeur de l'estimation de l'IR liée à la multitude et à la fréquence des caractères à mesurer. Son

interprétation directe est plus délicate que celle de l'indicateur type ratio : un IR positif indique que la vache a mangé plus que prévu pour couvrir ses besoins, elle est inefficace, et à l'inverse un IR négatif indique que la vache a mangé moins que prévu, elle est efficace (Figure 2).

b. L'estimation de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire par l'ingéré résiduel : de nombreux critères du calcul encore mal définis

Un ingéré résiduel très sensible à la fréquence et qualité des méthodes de mesures utilisées.

L'IR est par définition défini comme le résidu d'un modèle de régression linéaire multiple qui explique les QI. La variabilité interindividuelle de l'IR contient donc la variabilité interindividuelle des QI non expliquée par les dépenses énergétiques comptabilisées dans le modèle, mais aussi toutes les erreurs de mesure des variables du modèle et les erreurs d'ajustement du modèle (Robinson, 2005, Berry and Crowley, 2013). Le risque est donc d'interpréter la variabilité interindividuelle de l'IR comme étant la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire, alors qu'en fait une partie de cette variabilité est liée à de l'erreur. Parmi les études qui renseignent à la fois la variabilité de l'IR et la moyenne des QI, la variabilité du coefficient de variation de l'IR est très forte allant de 2,9% (Xi *et al.*, 2016) à 13% (Hurley *et al.*, 2016). Cette gamme de variabilité s'explique principalement par la fréquence et la précision des méthodes de mesure utilisées pour les différentes variables du modèle (Tableau 3) : plus la fréquence de mesure des QI est faible, plus le coefficient de variation de l'IR est grand. L'écart important entre le coefficient de variation obtenu par Hurley *et al.* (2016) et le reste des coefficients de variation s'explique probablement par le manque de précision de la méthode utilisée pour estimer les QI : c'est la seule étude à avoir utilisé une méthode indirecte par marqueurs pour estimer les QI individuelles alors que les autres mesurent directement des QI individuelles journalières.

Ce lien entre variabilité de l'IR et fréquence et précision des méthodes de phénotypage est d'autant plus important à noter qu'il n'y a pas d'homogénéité des méthodes utilisées, y compris pour un même phénotype, et qu'il n'y a pas d'homogénéité dans la construction de la variable, y compris pour un phénotype mesuré avec une même méthode. Les QI sont majoritairement mesurées directement soit comme différence entre l'offert et les refus, soit en utilisant des pesées dynamiques du contenu de l'auge. Certains travaux (Coleman *et al.*, 2010, Vallimont *et al.*, 2011, Hurley *et al.*, 2016), basés sur de l'ingestion au pâturage, utilisent une méthode indirecte qui estime les QI à partir de marqueurs indigestibles dosés dans les fèces, notamment la « méthode des alcanes » (Mayes *et al.*, 1986). La précision de cette méthode indirecte reste

Tableau 3 Comparaison des fréquences et méthodes de mesure utilisées pour mesurer les quantités ingérées (QI) et les différents produits pris en compte pour calculer l'ingéré résiduel (IR), ainsi que le coefficient de variation (CV) de l'IR, le coefficient de détermination (R²) du modèle, le type de ration et la durée de la période de mesure.

Ref. ¹	QI		Produits			CV ² IR	R ²	Ration	Durée (j)
	Fréq.	méthode	PV	NEC	Lait				
1	1/j	directe	1/s		1/s	2,9	0,85	TMR	ND
2	1/j	directe	3/s	1/s	3/s	5,5	0,60	TMR	35
3	1/j	directe	1/s		1/m	6,0	0,84	TMR	150
4	1/j	directe	1/m		1/m	7,0	0,68	TMR	301
5	1/j	directe	1/2s		1/s	7,5	0,72	TMR	90
6	1/j	directe	1/s-1/m	1/s	1/s-1/m	9,4	0,90	TMR	210
7	4,5/lac.	indirecte	1/s	1/18j	1/s	13	0,59	pâturage	305

¹1 = Xi *et al.* (2016); 2= Macdonald *et al.* (2014); 3 = Yao *et al.* (2013); 4 = Manafiazar *et al.* (2013); 5 = Connor *et al.* (2013); 6 = Mantysaari *et al.* (2012); 7 = Hurley *et al.* (2016).

TMR = ration complète; MR = ration semi-complète; C = concentrés; ND = absence de données; j = jour; s = semaine; m = mois; lac. = lactation.

² le coefficient de variation est calculé comme le rapport entre l'écart-type de l'IR et la moyenne des QI. En effet, la moyenne des IR est par définition nulle.

insuffisante pour interpréter des différences interindividuelles comme étant de vraies différences de QI. La comparaison de cette méthode avec la méthode de référence pour estimer les QI montrent non seulement que l'erreur de prédiction moyenne de la mesure représente 14% de la moyenne des QI de référence, mais qu'en plus cette erreur augmente avec le pourcentage d'herbe dans la ration (Pérez-Ramírez *et al.*, 2012).

La comparaison des travaux sur l'efficacité alimentaire chez la vache laitière montre une forte variabilité des méthodes de mesure et des variables utilisées pour mesurer les variations de réserves corporelles (Tableau 2). Les variations de réserves corporelles sont estimées par les variations soit de PV, soit de poids vif vide, soit de NEC. Le PV présente l'avantage d'être aujourd'hui une mesure automatique accessible à haut débit alors que la NEC n'est pour l'instant mesurable que mensuellement ou bimensuellement par des notateurs entraînés et n'est pas facilement transposable entre différentes grilles de notation. La NEC présente l'avantage de ne mesurer que l'état des réserves corporelles alors que le PV cache aussi des variations de gabarit et de contenus digestifs (cf. paragraphe 1.b). La correction du PV par la matière sèche ingérée (**MSI**) permet de corriger le poids vif de la variation des contenus digestifs pour donner le poids vif vide (**PVV**). Cette correction est mathématiquement déconseillée, car le modèle pour estimer l'IR contiendrait une variable qui dépend de la variable dépendante du modèle, i.e. la MSI. La diversité des variables construites pour estimer les dépenses associées à la variation des réserves corporelles est forte (Tableau 2) allant de la simple variation, à la distinction entre

gain et perte. La séparation entre gain et perte pose la question d'un coût énergétique différent entre gain et perte. Chilliard *et al.* (1987) ont observé que le gain coûtait plus cher en énergie nette (EN) ingérée que l'EN ingérée qu'il y aurait à fournir pour une perte de réserves corporelles. Quand le gain et la perte ne sont pas distingués dans le modèle, la variabilité interindividuelle associée au gain et à la perte se retrouve par définition dans les résidus du modèle, donc dans la variabilité interindividuelle de l'IR. La question de la construction du choix des méthodes et de la construction des variables est importante, notamment pour interpréter correctement la variabilité de l'IR.

Un ingéré résiduel moyennement répétable, y compris intra-lactation.

Si l'efficacité est propre à un individu, on s'attend à ce que la mesure de cette efficacité soit répétable dans le temps. La répétabilité de l'IR recensée dans la bibliographie est très variable au sein d'une même période de production et est très modérée entre plusieurs périodes de production. Pour une même lactation, les répétabilités vont de 0,47 (Connor *et al.*, 2013) à 0,77 (Prendiville *et al.*, 2011) : la variabilité interindividuelle de l'IR n'est répétable que de 47 à 77% au cours d'une même lactation. Ces répétabilités sont très variables, y compris au sein d'une même étude : de 0,55 à 0,92 (Prendiville *et al.*, 2011) et de 0,55 à 0,90 (Tempelman *et al.*, 2015) chez la vache laitière. Cette répétabilité est beaucoup plus faible entre deux lactations avec des valeurs moyennes allant de 0,20 (Connor *et al.*, 2013) à 0,28 (Tempelman *et al.*, 2015) chez la vache laitière. Bien que peu d'études aient pu mesurer à la fois un IR durant la lactation et durant le tarissement, la corrélation entre un IR mesuré durant la lactation et durant le tarissement est très faible avec un coefficient de corrélation de 0,24 (Prendiville *et al.*, 2011). Ce manque de répétabilité de l'IR peut soit s'interpréter comme un manque de répétabilité de l'efficacité alimentaire, soit d'un manque de répétabilité de la méthode de mesure de l'IR. L'héritabilité peut être utilisée comme indicateur pour savoir si la composante génétique de l'IR, c'est-à-dire l'efficacité, est répétable. Les héritabilités recensées dans la bibliographie chez la vache laitière sont encore plus variables que les répétabilités : les héritabilités vont de 0 à 0,41 (Tableau 4). L'interprétation de ces héritabilités est cependant limitée par l'interprétation de la variance phénotypique de l'IR. En effet, la variance phénotypique de l'IR est non seulement très sensible à la fréquence et la précision des méthodes de mesure utilisées (paragraphe précédent), mais est en plus dépendante des composantes biologiques incluses dans le modèle utilisé pour l'estimer (paragraphe 1.a). Cette répétabilité moyenne intra-lactation montre l'importance de la définition d'une période de référence pour mesurer l'IR chez la vache laitière. La période de mesure de l'IR est très variable dans la bibliographie, aussi bien en durée que pour le stade de

début de mesure de l'IR au cours de la lactation (Tableau 2). Les périodes recensées vont de 35 jours (Macdonald *et al.*, 2014) à la lactation complète avec 305 jours (Manafiazar *et al.*, 2013, Hurley *et al.*, 2016) et démarrent à des stades très variables allant du début de lactation (Mantysaari *et al.*, 2012, Manafiazar *et al.*, 2013, Hurley *et al.*, 2016) à des stades en cours de lactation entre le 50^{ème} et 208^{ème} jour de lactation (Macdonald *et al.*, 2014, Tempelman *et al.*, 2015).

Tableau 4 Périodes de mesure de l'ingéré résiduel (IR) au cours de la lactation, répétabilité intra- et inter-lactation et corrélation intra-lactation de l'IR chez la vache laitière et héritabilité de l'IR recensés dans la bibliographie pour différentes espèces animales.

Ref. ¹	Espèce	Type d'article	Période lactation	Répétabilité		Héritabilité
				intralactation	Corrélation intra-lactation	
1	vache laitière	original	51-233	0,77 (0,55-0,92)	0,4 - 0,71	ND
2	vache laitière	original	1-210	ND	0,47	ND
3	vache laitière	synthèse	NA	NA	NA	0 - 0,38
4	vache laitière	original	1-90	0,47	0,63-0,83	ND
5	vache laitière	original	7-210	ND	ND	(0,03-0,37)
6	vache laitière	original	50-200	0,76 (0,55-0,90)	ND	0,15 (0,13-0,19)
				0,10 - 0,35		
7	vache laitière	original	5-305	ND	ND	0,2
8	vache laitière	original	50-200	ND	ND	0,15 (0,13-0,41)
3	bovin croissance	synthèse				0,07-0,62
9	porc	synthèse				0,1-0,6
10	veaux	original				0,27
11	poule pondeuse	original				0,14-0,60
12	poulet chair	synthèse				0,21-0,49
12	dinde	synthèse				0,22
13	poisson	original				0,06

ND = pas de données; NA = non adapté dans le cadre d'une synthèse.

¹1 = Prendiville *et al.* (2011); 2 = Mantysaari *et al.* (2012); 3 = Berry and Crowley (2013); 4 = Connor *et al.* (2013); 5 = Liinamo *et al.* (2015); 6 = Tempelman *et al.* (2015); 7 = Manafiazar *et al.* (2016); 8 = Yao *et al.* (2017); 9 = Knap and Wang (2012); 10 = Williams *et al.* (2011); 11 = Yuan *et al.* (2015); 12 = Willems *et al.* (2013); 13 = Grima *et al.* (2008).

III. Identification de mécanismes biologiques associés à la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire

a. Les mécanismes biologiques identifiés comme étant associés aux différences d'efficacité alimentaire entre animaux.

La variabilité de l'IR regroupe les variables non prises en compte dans le modèle mais aussi les erreurs d'ajustement du modèle. L'ajustement d'un modèle linéaire, classiquement utilisé pour estimer l'IR, implique l'estimation de l'efficacité moyenne du troupeau d'étude, traduit sous la forme des coefficients de la régression linéaire. Par exemple dans le cas du modèle estimant un REI, donc exprimant les QI en énergie nette, un coefficient de 0,90 UFL/UFL pour l'énergie nette du lait indique qu'en moyenne, pour la population de vaches étudiées, une augmentation de 1 UFL de lait se traduit par une augmentation de 0,90 UFL d'aliments ingérés : c'est ce qu'on appelle l'efficacité partielle pour la synthèse de lait. Ces coefficients moyens reflètent donc l'efficacité de l'animal moyen du troupeau. Tout écart à cet animal moyen se retrouve dans le résidu du modèle, i.e. le REI (Figure 3). Les écarts individuels à ces efficacités partielles constituent donc aussi une source de variabilité du RFI. Les différences interindividuelles du RFI peuvent donc non seulement provenir des variables de dépenses énergétiques non incluses dans le modèle, mais aussi de différences d'efficacité partielle dans les principales fonctions prises en compte pour estimer le RFI. Ces différences d'efficacité partielle peuvent se regrouper en deux catégories : les différences liées au processus de digestion et celles liées au processus métabolique (Figure 3).

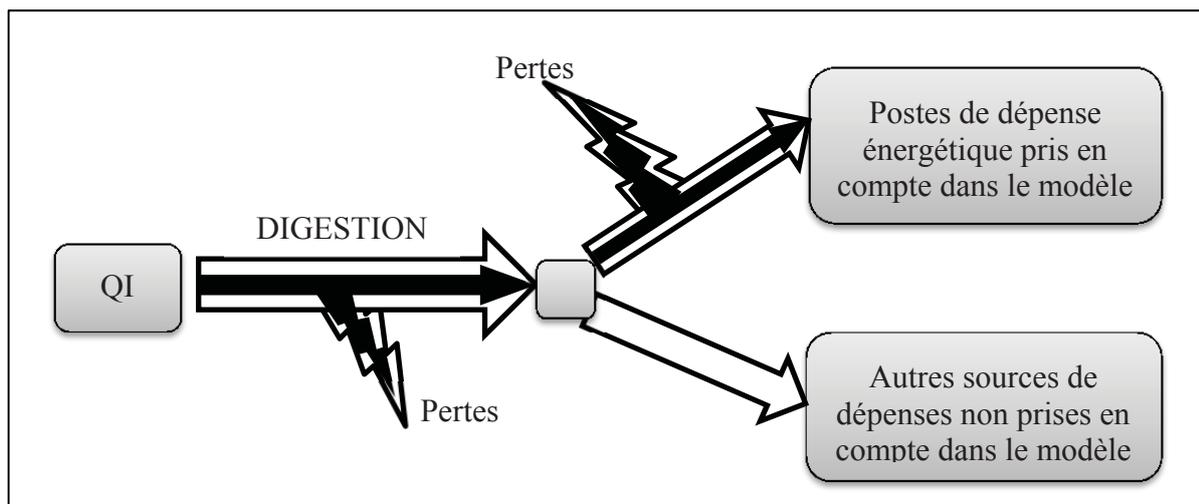


Figure 3 Définition des différences interindividuelles de l'ingéré résiduel (RFI ;) estimé comme la différence entre les quantités ingérées observées (QI) et les QI prédites () d'après les principales dépenses énergétiques.

Tableau 5 Synthèse bibliographique multi-espèces des caractères biologiques déjà testés pour leur relation avec la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire.

Ref ¹	Espèce	Activité physique	Comportement alimentaire		Entretien		Température corporelle	Hormone + Métabolites	Réserves corporelles	Article
			durée debout, poulx debout/coucher		Taille	Tissu + métabolisme basal				
1	veaux					poulx				O
2	VL					prolifération cellulaire, développement organes, os				O
3	VL					dimensions corps				O
4	VL					Digestibilité, rétention N, AGV				O
5	VL					vitesse ing, durée ing			température corporelle, <u>surface</u>	O
6	VL					extra-chaaleur				O
7	VL					Digestibilité, perte urine, CH4				O
8	VL					Digestibilité			AGNE, leptine, glucose, BHB, IGF, insuline, prolactine, ghreline	O
9	VL					durée ing, vitesse ing	taille poitrine			O
10	VA					durée ing, vitesse ing			AGNE, glucose, BHB	Epaisseur gras sous-cutané
11	truites									perte lipidique, épaisseur gras sous-cutané
12	truites									O
13	bovins		x			x				S
14	bovins					production chaleur				O
15	bovins					durée ing				O
16	bovins					microbiote, CH4				S
17	bovins					morphologie tissu rumen				O
18	bovins					fréquence respiration			température corporelle, surface	O
19	volaille poule					poils organes			AGL, TG, glucose, acide urique, leptine	composition corporelle
20	pond.	durée repos, sommeil, activité				poils intestin, production chaleur			chaleur digestive <u>température corporelle</u>	composition corporelle

Ref ¹	Espèce	Activité physique	Comportement alimentaire		Entretien		Température corporelle	Hormone	Réserves corporelles	Article
			durée ing, vitesse ing	nbr repas, vitesse ing	Taille	Tissu + métabolisme basal				
21	porcs				turnover tissue, dégradation protéines, métabolisme lipide, chaleur digestive				Epaisseur gras sous-cutané, gras intra-musculaire	O
22	porcs					Digestibilité				O
23	porcs				activité mitochondriale, taille tractus digestif	Digestibilité				O
24	porcs		durée ing, vitesse ing			Digestibilité, AGV, excrétion P, N, CH4	extra-chaleur	leptine	dépôt protéique	S
25	JB							BHB, glucose, urée, insuline, leptine, IGF, AGNE		O
26	JB		durée ing, vitesse ing						tissu adipeux marbrure, Epaisseur gras sous-cutané	O
27	JB		durée ing					AGNE, creatinine, BHB, glucose, urée, haptoglobine, IGF, insuline		O
28	JB		durée debout		longueur finale back, taille poitrine	Digestibilité				O
29	JB		durée ing			Digestibilité, pH rumen				O
30	JB		taille particule ingérée, vitesse ing, durée rumination, durée ing, durée repos			morphologie rumen			Lipides corporels	O
31	JB									O

Texte = la relation est significative (P<0,05) ; **Texte** = la relation n'est pas significative (P>0,05).

¹1 = Munro *et al.* (2016); 2 = Hou *et al.* (2012); 3 = Manafiazar *et al.* (2013); 4 = Rius *et al.* (2012); 5 = Connor *et al.* (2013); 6 = DiGiacomo *et al.* (2014); 7 = Arndt *et al.* (2015); 8 = Potts *et al.* (2017); 9 = Xi *et al.* (2016); 10 = Fitzsimons *et al.* (2014); 11 = Bergsma *et al.* (2009); 12 = Young and Dekkers (2012); 13 = Richardson and Herd (2004); 14 = Nkrumah *et al.* (2006); 15 = Montanholi *et al.* (2009); 16 = Khiaosa-ard and Zebeli (2014); 17 = Kong *et al.* (2016); 18 = Martello *et al.* (2016); 19 = Swennen *et al.* (2007); 20 = Tixier-Boichard *et al.* (2002); 21 = Dekkers and Gilbert (2010); 22 = Mauch *et al.* (2015); 23 = Montagne *et al.* (2014); 24 = Gilbert *et al.* (2017); 25 = Krueger *et al.* (2009); 26 = Kelly *et al.* (2010); 27 = Durunna *et al.* (2011); 28 = Lawrence *et al.* (2012); 29 = McGee *et al.* (2014); 30 = Macdonald *et al.* (2014); 31 = Pereira *et al.* (2016).

VL = vache laitière; VA = vache allaitante; JB = jeunes bovins; poule pond. = poule pondeuse; nbr = nombre ; ing = ingestion ; rétention N = rétention azotée ; AGV = acide gras volatil ; CH4 = méthane ; excrétion P = excrétion en phosphore ; excrétion N = excrétion en azote ; AGNE = acide gras non-estérifiés ; BHB = béta-hydroxybutyrate ; IGF = insulín like growth factor ; GH = hormone de croissance ; NEC = note d'état corporel ; O = article original ; S = synthèse ; x = caractères mesurés mais la variable utilisée n'est pas identifiée dans l'article.

Des différences de performances digestives.

Les différences d'efficacité alimentaire entre animaux d'une même espèce peuvent provenir de différences d'efficacité de digestion. Une partie de l'énergie brute ingérée par l'animal n'est pas utilisable pour son métabolisme : celle perdue dans les fèces et sous forme de gaz issus des fermentations ruminales (méthane ou dioxyde de carbone).

L'efficacité digestive des animaux ressort comme un caractère important pour expliquer les différences d'efficacité alimentaire, mais dont les résultats sont assez contrastés selon l'espèce et les conditions expérimentales. Les animaux qui ingèrent moins pour des niveaux de besoins équivalents seraient plus efficaces parce qu'ils digèrent mieux, c'est-à-dire perdent moins d'énergie dans les fèces. Cette relation négative entre RFI et meilleure digestibilité est contrastée dans la bibliographie (Tableau 5) avec des études observant ce lien entre efficacité et digestibilité (Mauch *et al.*, 2015, Potts *et al.*, 2017) et d'autres n'ayant pas pu démontrer ce lien (Durunna *et al.*, 2011, Gilbert *et al.*, 2017). Cependant, il est à noter que l'interprétation des différences interindividuelles de digestibilité est délicate, principalement parce que la répétabilité de la digestibilité intra-individu reste faible alors que les écarts interindividuels mesurés sont généralement faibles. Les coefficients de variation des mesures de digestibilité sont de l'ordre de 0,02, ce qui est faible et correspond à des écarts potentiels de digestibilité de 0,05 à 0,06 entre individus extrêmes au sein d'un lot (Dulphy *et al.*, 1995, Veerkamp and Emmans, 1995). De plus, ces mesures de digestibilité sont susceptibles de varier avec le stade de lactation (Doreau *et al.*, 1982), ce qui peut réduire la répétabilité de la mesure. Un autre facteur de variabilité à prendre en compte dans l'interprétation de la digestibilité est l'influence de la ration. En effet, la relation entre efficacité alimentaire et digestibilité est plus significative quand les animaux sont alimentés avec des rations moins digestibles, notamment plus riches en fibres, qu'avec des rations très digestibles (Mauch *et al.*, 2015, Potts *et al.*, 2017). La difficulté à estimer l'importance de la digestibilité dans l'efficacité alimentaire vient surtout de la lourdeur de la méthodologie, qui rend la mesure difficilement réalisable pour un effectif important, surtout s'il faut la répéter pour mieux estimer l'effet individuel.

Pendant la digestion, la perte de méthane est considérée comme une perte d'énergie, car non valorisée par l'animal. De plus, sur le plan environnemental, les émissions de méthane des ruminants constituent une source majeure de gaz à effet de serre. Réduire les émissions de méthane peut donc être un double enjeu : énergétique et environnemental. Les travaux se basant sur une estimation de l'efficacité définie comme le rapport entre production de lait et consommation observent une moindre émission de méthane par kg de lait (Arndt *et al.*, 2015). Cependant comme ces vaches produisent mais aussi consomment plus (Arndt *et al.*, 2015), la

différence d'émission de méthane observée n'est pas associée à une moindre émission de méthane à même production. Les études sur bovins en croissance basées sur des mesures de RFI observent des résultats contradictoires avec tantôt des émissions d'autant plus faibles que l'animal est efficient (Nkrumah *et al.*, 2006, Hegarty *et al.*, 2007), tantôt des émissions accrues pour les génisses les plus efficaces (Renand *et al.*, 2016). La corrélation négative de -0,33 obtenue pour des génisses dans Renand *et al.* (2016) entre le RFI et les émissions de méthane résiduelles est opposée à l'hypothèse formulée classiquement, car les génisses les plus efficaces d'après le RFI sont les moins efficaces sur les émissions de méthane résiduelles. Cette relation négative vient d'une émission de méthane par kg de MS ingérée beaucoup plus forte chez les génisses les plus efficaces qui pourraient provenir d'une meilleure digestion de la ration dans le rumen et expliquer l'amélioration de l'efficacité (Arndt *et al.*, 2015). Les mesures de méthane avec de nouveaux outils adaptés à de grands effectifs (GreenFeed[®], C-Lock Inc., Rapid City USA) vont sans doute permettre de mieux caractériser ces émissions. Cependant, le gain attendu sur les émissions de méthane lié à l'amélioration de l'efficacité alimentaire n'est peut-être pas aussi net que la réduction d'ingestion le laisserait espérer, en particulier si l'amélioration de l'efficacité alimentaire s'explique par l'amélioration de la digestion.

Des différences interindividuelles d'utilisation de l'énergie métabolisable pour les fonctions biologiques...

...prises en compte dans l'estimation de l'efficacité alimentaire.

Les différences d'efficacité alimentaire entre animaux peuvent provenir de différences interindividuelles à convertir l'énergie métabolisable en énergie nette pour les produits pris en compte dans le calcul de l'efficacité alimentaire. Parmi les dépenses énergétiques régulièrement prises en compte dans le calcul de l'efficacité figurent les dépenses associées à l'entretien et à la variation des réserves corporelles. De nombreuses études observent une relation entre efficacité alimentaire et entretien : que ce soit chez le porc (Dekkers and Gilbert, 2010), la volaille (Tixier-Boichard *et al.*, 2002), la vache laitière (Hou *et al.*, 2012) ou les taurillons (Richardson and Herd, 2004). De la même manière, de nombreuses études observent une relation entre variations des réserves corporelles ou gain de poids et efficacité, que ce soit chez la truie (Young and Dekkerds, 2012), la vache laitière (Xu *et al.*, 2016) ou les jeunes bovins (Lawrence *et al.*, 2012). Ces relations observées peuvent se traduire en deux hypothèses : 1/ pour une fonction donnée, l'animal efficace produit plus à partir d'une même variation d'énergie métabolisable ou 2/ la composition du produit n'est pas la même entre individus, c'est-à-dire qu'il y a un décalage

entre ce qui est mesuré et la réalité. Le facteur limitant réside là encore dans la fiabilité des méthodes de mesure employées pour mesurer les phénotypes. Que ce soit pour l'entretien avec l'utilisation du poids vif métabolique ou pour les variations de réserves corporelles avec l'utilisation des variations de PV ou de NEC, une même variation de ces phénotypes ne reflète pas forcément la même dépense énergétique pour tous les animaux (cf. paragraphe 1.b). En effet, des différences de composition corporelle pour une même variation de PV ou NEC, ou des différences de taille de tractus digestif ou de niveau d'ingestion pour un même poids métabolique existent entre individus (Cannas *et al.*, 2010). Cette hypothèse de différence de composition d'un même produit entre individus est soutenue par la relation observée dans plusieurs études entre l'efficacité alimentaire et la composition corporelle, l'activité cellulaire, la taille des organes ou la taille du tractus digestif chez les bovins non laitiers, porcs et volaille (Tableau 5).

...non prises en compte dans l'estimation de l'efficacité alimentaire.

Parmi les dépenses énergétiques non prises en compte classiquement dans l'estimation de l'efficacité alimentaire figurent l'activité physique et la thermogénèse. Les animaux peuvent apparaître plus efficaces parce qu'ils dépensent moins d'énergie dans l'activité physique et dans la thermogénèse. Cette hypothèse est largement soutenue dans la bibliographie, notamment pour l'activité physique (Tableau 5). Une moindre activité physique pourrait cependant être interprétée comme une plus grande difficulté à se mouvoir. Chez le porc, l'activité plus faible des porcs les plus efficaces n'étaient pas associée à une prévalence plus forte des boiteries, mais au contraire l'activité plus forte des moins efficaces était associée à une prévalence accrue des boiteries (Meunier-Salaün *et al.*, 2014). En ce qui concerne la thermogénèse, les résultats obtenus chez les monogastriques montrent par exemple que les plus efficaces produisent moins de chaleur associée à la digestion que les moins efficaces (Bordas and Minvielle, 1997, Gilbert *et al.*, 2017). L'acclimatation des porcs les plus efficaces à des températures chaudes est plus rapide que pour les porcs les moins efficaces (Gilbert *et al.*, 2017) alors que l'inverse est observé chez la poule pondeuse (Bordas and Minvielle, 1997). L'hypothèse émise pour expliquer ce résultat chez les porcs est que les moins efficaces ont une activité mitochondriale plus forte et donc une production de chaleur accrue par rapport aux plus efficaces. Cependant, cette acclimatation plus lente des porcs moins efficaces ne se traduit pas en une plus faible capacité à dissiper la chaleur par évapotranspiration (Gilbert *et al.*, 2017). La consommation d'eau accrue pour les porcs efficaces leur permettrait sans doute de dissiper plus facilement la chaleur produite (Gilbert *et al.*, 2017). Chez les bovins, et plus particulièrement les vaches

laitières, les études ayant réalisées des mesures de température corporelle et de chaleur produite sont rares (Tableau 5). Chez les bovins, la relation entre efficacité alimentaire et thermogénèse est variable pour ces quelques études : certaines observant une température corporelle plus faible et une température superficielle plus élevée pour les bovins les plus efficaces (Martello *et al.*, 2016), alors que d'autres (DiGiacomo *et al.*, 2014) ne voient pas de différences entre les plus et les moins efficaces. Cette différence inter-études relève probablement de la différence de fréquence des mesures réalisées et de la différence d'effectif, plus importantes dans Martello *et al.* (2016).

Une autre fonction non prise en compte dans l'estimation du REI mais qui est responsable de différences interindividuelles d'énergie nette ingérée est le comportement alimentaire. Que ce soit chez le porc (Gilbert *et al.*, 2017), la volaille (Xu *et al.*, 2016), les bovins allaitants (Richardson and Herd, 2004), les jeunes bovins (Pereira *et al.*, 2016) ou la vache laitière (Connor *et al.*, 2013), les différences d'efficacité alimentaire étaient associées à des différences de comportement alimentaire entre individus : taille, durée ou fréquence des repas, vitesse d'ingestion (Tableau 5). Ces résultats ne permettent cependant pas de conclure sur la relation de causalité entre le comportement alimentaire et l'efficacité alimentaire.

b. Des approches méthodologiques variées pour identifier les déterminants de l'efficacité alimentaire mais difficiles à appliquer chez la vache laitière

Deux méthodes utilisées dans la bibliographie : caractérisation de la variabilité génétique après construction de lignées IR divergentes ou caractérisation de la variabilité phénotypique de l'IR.

Pour identifier les déterminants biologiques de l'efficacité alimentaire, certains travaux travaillent sur une population de base pour laquelle ils mesurent à la fois un IR et un ensemble de phénotypes qu'ils jugent candidats pour expliquer les différences interindividuelles d'efficacité alimentaire (Richardson and Herd, 2004, Bergsma *et al.*, 2009, Mantysaari *et al.*, 2012). Cette approche n'analyse que les différences phénotypiques caractérisant l'efficacité alimentaire. Pour un objectif de sélection sur l'efficacité alimentaire, la caractérisation génétique est obligatoire. Comme le phénotype résulte de l'expression des gènes dans un environnement considéré, une différence significative phénotypique ne garantit pas une différence génétique significative du caractère en question. A cet effet, des travaux réalisés principalement chez le porc (Gilbert *et al.*, 2017) ou chez la volaille (Tixier-Boichard *et al.*, 2002, Swennen *et al.*, 2007) ont construit des lignées divergentes sélectionnées sur l'IR et les

ont caractérisées phénotypiquement et physiologiquement. L'avantage de cette approche est qu'elle étudie la robustesse de l'indicateur mis en place au fil des générations successives, car les lignées sont génétiquement divergentes pour le caractère étudié, i.e. les différences interindividuelles sont réellement associées à des différences d'efficacité alimentaire. L'avantage de l'approche par lignées divergentes est qu'elle conserve une population peu efficace, qui ne serait sans doute pas maintenue dans le cas d'une sélection traditionnelle. Pour choisir l'approche entre caractérisation de la variabilité phénotypique de l'IR ou des différences génétiques issues d'une sélection divergente sur l'IR, la question à se poser est de savoir si l'objectif est simplement d'identifier les animaux efficaces ou inefficaces dans le troupeau, auquel cas l'approche de la caractérisation phénotypique de l'efficacité alimentaire suffit. À l'inverse si la question est d'améliorer l'efficacité alimentaire du troupeau, l'approche par lignées divergentes est à privilégier, malgré l'existence d'une interaction génétique/environnement pour l'efficacité alimentaire (Durunna *et al.*, 2011).

Cas de la vache laitière : caractérisation de la variabilité phénotypique de l'IR, car la construction de lignées IR divergentes est difficile.

Dans le cas de la vache laitière, l'approche par la sélection est plus difficile, principalement parce que les mesures phénotypiques nécessaires pour construire les lignées divergentes sont difficilement accessibles pour de grands effectifs et les intervalles entre générations sont longs. L'approche de l'étude de la variabilité phénotypique de l'efficacité alimentaire est donc privilégiée. La difficulté majeure est de conclure sur la nature de la relation entre la variable mesurée pour caractériser un mécanisme donné et l'efficacité alimentaire. En effet, la plupart des études ne se focalisent que sur quelques mécanismes à la fois et ne mesurent donc pas simultanément l'ensemble des mécanismes potentiels (Tableau 5). Le risque d'une approche partielle des déterminants est d'identifier un mécanisme comme déterminant de l'efficacité alimentaire, alors qu'en fait il peut être la conséquence d'un autre mécanisme non mesuré. Chez la vache laitière, ce constat est d'autant plus problématique que les études ne sont pas vraiment comparables entre elles parce que la méthodologie de l'estimation de l'efficacité alimentaire est très hétérogène (cf. paragraphe 2.). La variabilité des méthodologies utilisées pour estimer l'efficacité alimentaire ainsi que la variabilité des environnements expliquent probablement pourquoi la significativité de la relation entre l'efficacité alimentaire et certaines variables est très variable entre études (Tableau 5). L'homogénéisation de la définition de l'efficacité alimentaire chez la vache laitière permettrait sans doute de mieux comparer les travaux sur les déterminants de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire.

c. Le développement de nouvelles technologies offre des perspectives pour l'étude des déterminants de l'efficacité alimentaire.

Que ce soit chez la vache laitière ou d'autres espèces, les mécanismes potentiellement explicatifs des différences interindividuelles d'efficacité alimentaire sont rarement mesurables en routine. L'essor récent des outils d'élevage de précision rend accessible à haut débit et avec précision la mesure de phénotypes qui, jusqu'alors étaient soupçonnés avoir un lien avec l'efficacité alimentaire mais restaient difficiles à mesurer, tels que le comportement alimentaire, l'activité physique ou la température corporelle.

Le comportement alimentaire était traditionnellement mesuré par analyse vidéo ou par des capteurs de mouvements de mâchoire connectés à des enregistreurs, mais ces techniques restaient chronophages. Le développement d'outils tels que les accéléromètres permettent aujourd'hui de mesurer à haut débit et avec précision le comportement alimentaire et non alimentaire. Des durées individuelles passées à l'ingestion, debout ou couché ou encore à ruminer pour les ruminants, deviennent accessibles en élevage (Ringgenberg *et al.*, 2010, Delagarde and Lemonnier, 2015, Swartz *et al.*, 2016, Borchers *et al.*, 2016).

Un autre poste de dépense d'intérêt pour mieux comprendre les différences d'efficacité alimentaire est la régulation de la température corporelle, principalement liée à la production de chaleur associée aux fermentations ruminales chez la vache laitière et à la dissipation de la chaleur. La chaleur produite par les fermentations ruminales peut s'approcher en utilisant des mesures de température ruminale, et notamment ses variations au cours de la journée. La dissipation de la chaleur peut se faire par la buvée d'eau ou par évapotranspiration. Le développement de thermobolus ruminiaux chez les ruminants permet non seulement d'avoir un suivi régulier de la température ruminale mais en plus, les buvées de l'animal (Bewley *et al.*, 2008a). En effet la température ruminale chute suite à l'ingestion d'eau et permet donc un suivi de la fréquence de buvée de l'animal et en théorie de la quantité d'eau bue. L'accès à la température superficielle, nécessaire pour approcher de façon indirecte les pertes de chaleurs par évapotranspiration, reste limité. Cette température superficielle est mesurable par caméra infra-rouge, telle que celle utilisée dans Montanholi *et al.* (2009) ou Martello *et al.* (2016). Cette méthode reste difficilement utilisable à haut débit et peu répétable parce qu'elle est sensible à l'environnement extérieur et à la définition de la zone anatomique utilisée.

Chez la vache laitière et les femelles reproductrices, un intérêt majeur est d'arriver à mesurer à haut débit l'état et la variation d'état des réserves corporelles (cf. paragraphe 1.b). Le développement d'outil d'imagerie, par échographies à ultrasons ou par analyse de forme

d'images bidimensionnelles ou 3D (cf. paragraphe 1.b), et le développement de modélisation des réserves corporelles à partir des variations de PV (Thorup *et al.*, 2013) offrent des perspectives prometteuses pour objectiver et automatiser l'estimation de l'état des réserves corporelles, qui deviennent accessibles à haut débit.

Conclusion générale

Cette synthèse bibliographique met en avant la complexité de l'estimation et de l'interprétation de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire chez la vache laitière. La difficulté à mesurer les quantités ingérées individuelles est un frein majeur pour étudier l'efficacité alimentaire et pose la question du développement d'indicateurs indirects de l'efficacité alimentaire qui ne nécessitent pas la mesure des quantités ingérées. Cette complexité semble principalement liée à l'absence de définition biologique homogène de l'efficacité alimentaire dans les travaux déjà réalisés et la variabilité des méthodes de mesure utilisées. Cette synthèse a notamment montré que la variabilité interindividuelle du principal indicateur utilisé pour estimer la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire semblait très liée à la fréquence et précision des méthodes de phénotypage utilisées. Pour mieux comprendre d'où viennent les différences interindividuelles d'efficacité alimentaire chez la vache laitière, il semblerait donc essentiel d'utiliser des méthodes de phénotypage précises et utilisables fréquemment. Cette synthèse a aussi montré que l'approche la plus intéressante pour comprendre et identifier les facteurs de variations de l'efficacité alimentaire était de caractériser des lignées divergentes sur l'efficacité alimentaire. Cette approche n'est pas réalisable en vaches laitières, notamment à cause de la difficulté de rassembler l'ensemble des phénotypes nécessaires sur un grand effectif pour estimer l'efficacité alimentaire. L'approche qui vise à caractériser la variabilité phénotypique est donc privilégiée chez la vache laitière. L'absence d'approche exhaustive cumulant l'ensemble des mécanismes biologiques potentiellement explicatifs des différences interindividuelles d'efficacité alimentaire est à noter chez la vache laitière. Cette approche exhaustive est essentielle pour mieux comprendre comment chaque mécanisme est impliqué dans l'efficacité alimentaire.

Références

Aggrey SIE and Rekaya R 2013. Dissection of Koch's residual feed intake: Implications for selection. Poultry Science 92, 2600-2605.

- Arndt C, Powell JM, Aguerre MJ, Crump PM and Wattiaux MA 2015. Feed conversion efficiency in dairy cows: Repeatability, variation in digestion and metabolism of energy and nitrogen, and ruminal methanogens. *Journal of Dairy Science* 98, 3938-3950.
- Azzaro G, Caccamo M, Ferguson JD, Battiato S, Farinella GM, Guarnera GC, Puglisi G, Petriglieri R and Licitra G 2011. Objective estimation of body condition score by modeling cow body shape from digital images. *Journal of Dairy Science* 94, 2126-2137.
- Bastin C and Gengler N 2013. Genetic of body condition score as an indicator of dairy cattle fertility. A review. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment* 17, 64-75.
- Bazin S 1984. Grille de notation de l'état d'engraissement des vaches Pie Noires. Institut technique de l'élevage bovin, Paris, France.
- Bercovich A, Edan Y, Alchanatis V, Moallem U, Parmet Y, Honig H, Maltz E, Antler A and Halachmi I 2013. Development of an automatic cow body condition scoring using body shape signature and Fourier descriptors. *Journal of Dairy Science* 96, 8047-8059.
- Bergsma R, Kanis E, Verstegen MWA, van der Peet-Schwering CMC and Knol EF 2009. Lactation efficiency as a result of body composition dynamics and feed intake in sows. *Livestock Science* 125, 208-222.
- Berry DP and Crowley JJ 2013. CELL BIOLOGY SYMPOSIUM: Genetics of feed efficiency in dairy and beef cattle. *Journal of Animal Science* 91, 1594-1613.
- Bewley JM, Grott MW, Einstein ME and Schutz MM 2008a. Impact of intake water temperatures on reticular temperatures of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 91, 3880-3887.
- Bewley JM, Peacock AM, Lewis O, Boyce RE, Roberts DJ, Coffey MP, Kenyon SJ and Schutz MM 2008b. Potential for estimation of body condition scores in dairy cattle from digital images. *Journal of Dairy Science* 91, 3439-3453.
- Borchers MR, Chang YM, Tsai IC, Wadsworth BA and Bewley JM 2016. A validation of technologies monitoring dairy cow feeding, ruminating, and lying behaviors. *Journal of Dairy Science* 99, 7458-7466.
- Bordas A and Minvielle F 1997. Réponse à la chaleur de poules pondeuses issues de lignées sélectionnées pour une faible (R-) ou forte (R+) consommation alimentaire résiduelle. *Genetics Selection Evolution* 29, 279-290.
- Brethour JR 1992. The repeatability and accuracy of ultrasound in measuring backfat of cattle. *Journal of Animal Science* 70, 1039-1044.
- Buckley F, O'Sullivan K, Mee JF, Evans RD and Dillon P 2003. Relationships among milk yield, body condition, cow weight, and reproduction in spring-calved Holstein-Friesians. *Journal of Dairy Science* 86, 2308-2319.
- Cannas A, Atzori AS, Teixeira IAMA, Sainz RD and Oltjen JW 2010. The energetic cost of maintenance in ruminants: from classical to new concepts and prediction systems. In *Energy and protein*

- metabolism and nutrition. 3rd EAAP International Symposium on Energy and Protein Metabolism and Nutrition, 6-10/09/2010, Parma, Italy, pp. 531-542.
- Chanteloube A, Gicquel M, Le Chenadec H, Leroy M, Fischer A, Montagne L and Jurquet J 2015. Etat des lieux de l'utilisation de la notion d'efficience alimentaire par la filière bovin lait. In 22ème Journées Rencontres Recherches Ruminants, 02-03/12/2016, Paris, France, p. 257.
- Chilliard Y, Rémond B, Sauvant D and Vermorel M 1983. Particularités du métabolisme énergétique. Bulletin Technique C.R.Z.V. Theix INRA 53, 37-64.
- Chilliard Y, Rémond B, Agabriel J, Robelin J and Verite R 1987. Variations du contenu digestif et des réserves corporelles au cours du cycle gestation-lactation. Bulletin Technique C.R.Z.V. de Theix 70, 117-131.
- Coleman J, Berry DP, Pierce KM, Brennan A and Horan B 2010. Dry matter intake and feed efficiency profiles of 3 genotypes of Holstein-Friesian within pasture-based systems of milk production. Journal of Dairy Science 93, 4318-4331.
- Connor EE 2015. Invited review: Improving feed efficiency in dairy production: challenges and possibilities. Animal 9, 395-408.
- Connor EE, Hutchison JL, Norman HD, Olson KM, Van Tassell CP, Leith JM and Baldwin RL 2013. Use of residual feed intake in Holsteins during early lactation shows potential to improve feed efficiency through genetic selection. Journal of Animal Science 91, 3978-3988.
- Davis SR, Macdonald KA, Waghorn GC and Spelman RJ 2014. Residual feed intake of lactating Holstein-Friesian cows predicted from high-density genotypes and phenotyping of growing heifers. Journal of Dairy Science 97, 1436-1445.
- Dekkers JC and Gilbert H 2010. Genetic and biological aspect of residual feed intake in pigs. In Proceedings of the 9th. World Congress on Genetics applied to Livestock production, 01-06/08/2010, Leipzig, Germany, pp. 1-8.
- Delagarde R and Lemonnier JP 2015. Accuracy of the FeedPhone device for recording eating and rumination times in dairy cows. In 18th Symposium of the European Grassland Federation, 15-17/06/2015, Wageningen, The Netherlands, pp. 203-205.
- Devun J and Guinot C 2012. Alimentation des bovins: rations moyennes et autonomie alimentaire. L'institut de l'Elevage, Paris, France.
- DiGiacomo K, Marett L, Wales B, Hayes B, Dunshea F and Leury B 2014. Thermoregulatory differences in lactating dairy cattle classed as inefficient based on residual feed intake (RFI). Animal Production Science 59, 1877-1881.
- Doreau M, Rémond B, Fléchet J, Lefaiivre R, Ollier A and Sornet C 1982. Comportement alimentaire et utilisation digestive d'une ration de composition constante chez la vache laitière en fin de gestation et début de lactation. Reproduction Nutrition Développement 22, 307-324.
- Dulphy JP, Balch CC and Doreau M 1995. Adaptation des espèces domestiques à la digestion des aliments lignocellulosiques. In Nutrition des ruminants domestiques ingestion et digestion (eds.

- R Jarrige, Y Ruckebusch, C Demarquilly, MH Farce and M Journet), pp. 759-803, Editions INRA, Paris, France.
- Durunna ON, Wang Z, Basarab JA, Okine EK and Moore SS 2011. Phenotypic and genetic relationships among feeding behavior traits, feed intake, and residual feed intake in steers fed grower and finisher diets. *Journal of Animal Science* 89, 3401-3409.
- Fitzsimons C, Kenny DA, Fahey AG and McGee M 2014. Feeding behavior, ruminal fermentation, and performance of pregnant beef cows differing in phenotypic residual feed intake offered grass silage. *Journal of Animal Science* 92, 2170-2181.
- Gabarrou J-F, Géraert P-A, Picard M and Bordas A 1997. Diet-Induced thermogenesis in cockerels is modulated by genetic selection for high or low residual feed intake. *The Journal of Nutrition* 127, 2371-2376.
- Garnsworthy PC 1988. The effect of energy reserves at calving on performance of dairy cows. In *Nutrition and lactation in the dairy cow* (ed. PC Garnsworthy), pp. 157-170, Butterworths, Tiptree, UK.
- Gilbert H, Billon Y, Brossard L, Faure J, Gatellier P, Gondret F, Labussière E, Lebreton B, Lefaucheur L, Le Floch N, Louveau I, Merlot E, Meunier-Salaün MC, Montagne L, Mormede P, Renaudeau D, Riquet J, Rogel-Gaillard C, van Milgen J, Vincent A and Noblet J 2017. Review: divergent selection for residual feed intake in the growing pig. *Animal*, 1-13.doi: <http://dx.doi.org/10.1017/s175173111600286x>
- Gillund P, Reksen O, Gröhn YT and Karlberg K 2001. Body condition related to ketosis and reproductive performance in Norwegian dairy cows. *Journal of Dairy Science* 84, 1390-1396.
- Grima L, Quillet E, Boujard T, Robert Granié C, Chatain B and Mambrini M 2008. Genetic variability in residual feed intake in rainbow trout clones and testing of indirect selection criteria. *Genetics Selection Evolution* 40, 607-624.
- Hegarty RS, Goopy JP, Herd RM and McCorkell B 2007. Cattle selected for lower residual feed intake have reduced daily methane production. *Journal of Animal Science* 85, 1479-1486.
- Hou Y, Bickhart D, Chung H, Hutchison J, Norman HD, Connor E and Liu G 2012. Analysis of copy number variations in Holstein cows identify potential mechanisms contributing to differences in residual feed intake. *Functional & Integrative Genomics* 12, 717-723.
- Hurley AM, López-Villalobos N, McParland S, Kennedy E, Lewis E, O'Donovan M, Burke JL and Berry DP 2016. Inter-relationships among alternative definitions of feed efficiency in grazing lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 99, 468-479.
- Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) 2010. *Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeurs des aliments: tables Inra 2007 mise à jour 2010*. Quae, Versailles, France.

- Kelly AK, McGee M, Crews DH, Fahey AG, Wylie AR and Kenny DA 2010. Effect of divergence in residual feed intake on feeding behavior, blood metabolic variables, and body composition traits in growing beef heifers. *Journal of Animal Science* 88, 109-123.
- Khiaosa-ard R and Zebeli Q 2014. Cattle's variation in rumen ecology and metabolism and its contributions to feed efficiency. *Livestock Science* 162, 66-75.
- Knap PW and Wang L 2012. Pig breeding for improved feed efficiency. In *Feed efficiency in swine* (ed. JF Patience), pp. 167-181, Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
- Koch RM, Swiger LA, Chambers D and Gregory KE 1963. Efficiency of feed use in beef cattle. *Journal of animal science* 22, 486-494.
- Kong RSG, Liang G, Chen Y, Stothard P and Guan LL 2016. Transcriptome profiling of the rumen epithelium of beef cattle differing in residual feed intake. *BMC Genomics* 17, 1-16.
- Krueger WK, Carstens GE, Gomez RR, Bourg BM, Lancaster PA, Slay LJ, Miller JC, Anderson RC, Horrocks SM, Krueger NA and Forbes TDA 2009. Relationships between residual feed intake and apparent nutrient digestibility, in vitro methane producing activity and VFA concentrations in growing Brangus heifers. In *ASAS Joint annual meeting, 12-16/07/2009, Montreal, Canada*, p. 153.
- Lawrence P, Kenny DA, Earley B and McGee M 2012. Grazed grass herbage intake and performance of beef heifers with predetermined phenotypic residual feed intake classification. *Animal* 6, 1648-1661.
- Liinamo AE, Mäntysaari P, Lidauer MH and Mäntysaari EA 2015. Genetic parameters for residual energy intake and energy conversion efficiency in Nordic Red dairy cattle. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science* 65, 63-72.
- Macdonald KA, Pryce JE, Spelman RJ, Davis SR, Wales WJ, Waghorn GC, Williams YJ, II, Maret LC and Hayes BJ 2014. Holstein-Friesian calves selected for divergence in residual feed intake during growth exhibited significant but reduced residual feed intake divergence in their first lactation. *Journal of Dairy Science* 97, 1427-1435.
- Manafiazar G, McFadden T, Goonewardene L, Okine E, Basarab J, Li P and Wang Z 2013. Prediction of residual feed intake for first-lactation dairy cows using orthogonal polynomial random regression. *Journal of Dairy Science* 96, 7991-8001.
- Manafiazar G, Goonewardene L, Miglior F, Crews DH, Basarab JA, Okine E and Wang Z 2016. Genetic and phenotypic correlations among feed efficiency, production and selected conformation traits in dairy cows. *Animal* 10, 381-389.
- Mantysaari P, Liinamo AE and Mantysaari EA 2012. Energy efficiency and its relationship with milk, body, and intake traits and energy status among primiparous Nordic Red dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 95, 3200-3211.

- Martello LS, da Luz e Silva S, Gomes RD, Corte R and Leme PR 2016. Infrared thermography as a tool to evaluate body surface temperature and its relationship with feed efficiency in *Bos indicus* cattle in tropical conditions. *International Journal of Biometeorology* 60, 173-181.
- Mauch, E. D., N. K. Gabler, N. V. Serão, T. E. Weber, J. F. Patience, B. Kerr, and J. C. M. Dekkers. 2015. Effect of low energy, high fiber diets on digestibility traits in pigs selected for residual feed intake. *Animal Industry Report: AS 661, ASL R3033*. Available on: http://lib.dr.iastate.edu/ans_air/vol661/iss1/96 (Accessed on 19/12/2016).
- Mayes RW, Lamb CS and Colgrove PM 1986. The use of dosed and herbage n-alkanes as markers for the determination of herbage intake. *The Journal of Agricultural Science* 107, 161-170.
- McGee M, Ramirez JA, Carstens GE, Price WJ, Hall JB and Hill RA 2014. Relationships of Feeding Behaviors with efficiency in RFI-divergent Japanese Black Cattle. *Journal of Animal Science* 92, 3580-3590.
- Meunier-Salaün MC, Guérin C, Billon Y, Sellier P, Noblet J and Gilbert H 2014. Divergent selection for residual feed intake in group-housed growing pigs: characteristics of physical and behavioural activity according to line and sex. *Animal* 8, 1898-1906.
- Montagne L, Loisel F, Le Naou T, Gondret F, Gilbert H and Le Gall M 2014. Difference in short-term responses to a high-fiber diet in pigs divergently selected for residual feed intake. *Journal of Animal Science* 92, 1512-1523.
- Montanholi YR, Swanson KC, Schenkel FS, McBride BW, Caldwell TR and Miller SP 2009. On the determination of residual feed intake and associations of infrared thermography with efficiency and ultrasound traits in beef bulls. *Livestock Science* 125, 22-30.
- Munro JC, Schenkel FS, Physick-Sheard PW, Fontoura ABP, Miller SP, Tennessen T and Montanholi YR 2016. Associations of acute stress and overnight heart rate with feed efficiency in beef heifers. *Animal* 11, 452-460.
- National Research Council 2001. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Seventh Revised Edition, 2001*. The National Academies Press, Washington, DC, USA.
- Nkrumah JD, Okine EK, Mathison GW, Schmid K, Li C, Basarab JA, Price MA, Wang Z and Moore SS 2006. Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. *Journal of Animal Science* 84, 145-153.
- Patience JF, Rossoni-Serão MC and Gutiérrez NA 2015. A review of feed efficiency in swine: biology and application. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 6, 1-9.
- Pereira MCS, Cruz GD, Arrigoni MDB, Rigueiro ALN, Silva J, Carrara TVB, Santos PCS, Cursino LL and Millen DD 2016. Relationships of feedlot performance, feeding behavior, rumen morphometrics, and carcass characteristics of Nelore cattle differing in phenotypic residual feed intake. *Journal of Animal Science* 94, 4287-4296.

- Pérez-Ramírez E, Peyraud JL and Delagarde R 2012. N-alkanes v. ytterbium/faecal index as two methods for estimating herbage intake of dairy cows fed on diets differing in the herbage : maize silage ratio and feeding level. *Animal* 6, 232-244.
- Potts SB, Boerman JP, Lock AL, Allen MS and VandeHaar MJ 2017. Relationship between residual feed intake and digestibility for lactating Holstein cows fed high and low starch diets. *Journal of Dairy Science* 100, 265-278.
- Prendiville R, Pierce KM, Delaby L and Buckley F 2011. Animal performance and production efficiencies of Holstein-Friesian, Jersey and Jersey x Holstein-Friesian cows throughout lactation. *Livestock Science* 138, 25-33.
- Pryce JE, Arias J, Bowman PJ, Davis SR, Macdonald KA, Waghorn GC, Wales WJ, Williams YJ, Spelman RJ and Hayes BJ 2012. Accuracy of genomic predictions of residual feed intake and 250-day body weight in growing heifers using 625,000 single nucleotide polymorphism markers. *Journal of Dairy Science* 95, 2108-2119.
- Rajaei Sharifabadi H, Naserian AA, Valizadeh R, Nassiry MR, Bottje WG and Redden RR 2016. Growth performance, feed digestibility, body composition, and feeding behavior of high- and low-residual feed intake fat-tailed lambs under moderate feed restriction. *Journal of Animal Science* 94, 3382-3388.
- Renand G, Vinet A and Maupetit D 2016. Relations entre émissions de méthane entérique et efficacité alimentaire chez des génisses charolaises en croissance. In 23ème Journées Rencontres Recherches Ruminants, 07-08/12/2016, Paris, France, pp. 19-22.
- Richardson EC and Herd RM 2004. Biological basis for variation in residual feed intake in beef cattle. 2. Synthesis of results following divergent selection. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 44, 431-440.
- Ringgenberg N, Bergeron R and Devillers N 2010. Validation of accelerometers to automatically record sow postures and stepping behaviour. *Applied Animal Behaviour Science* 128, 37-44.
- Rius AG, Kittelmann S, Macdonald KA, Waghorn GC, Janssen PH and Sikkema E 2012. Nitrogen metabolism and rumen microbial enumeration in lactating cows with divergent residual feed intake fed high-digestibility pasture. *Journal of Dairy Science* 95, 5024-5034.
- Robelin J, Barboiron C and Jailler R 1982. Relation entre l'espace de diffusion de l'eau lourde mesurée in vivo et le volume hydrique corporel des bovins en croissance. *Reproduction Nutrition Développement* 22, 65-73.
- Robinson DL 2005. Assessing the accuracy of modelling weight gain of cattle using feed efficiency data. *Livestock Production Science* 95, 187-200.
- Roche JR, Dillon PG, Stockdale CR, Baumgard LH and VanBaale MJ 2004. Relationships among international body condition scoring systems. *Journal of Dairy Science* 87, 3076-3079.

- Roche JR, Macdonald KA, Burke CR, Lee JM and Berry DP 2007. Associations among body condition score, body weight, and reproductive performance in seasonal-calving dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 90, 376-391.
- Roche JR, Friggens NC, Kay JK, Fisher MW, Stafford KJ and Berry DP 2009. Invited review: Body condition score and its association with dairy cow productivity, health, and welfare. *Journal of Dairy Science* 92, 5769-5801.
- Saviotto D, Berry DP and Friggens NC 2014. Towards an improved estimation of the biological components of residual feed intake in growing cattle. *Journal of Animal Science* 92, 467-476.
- Schröder UJ and Staufenbiel R 2006. Invited Review: Methods to determine body fat reserves in the dairy cow with special regard to ultrasonographic measurement of backfat thickness. *Journal of Dairy Science* 89, 1-14.
- Staub C, Touze JL, Mouaze C, Egal D, Giraud JM, Briant E, Touchard A, Muller N, Vincent F, Colette S, Dozias D, Renand G, De La Torre Capitan A and Agabriel J 2016. Ultrasonography as a method to determine body composition in cattle. In 67th Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), 29/08/2016-02/09/2016, Belfast, UK, p. 625.
- Swartz TH, McGilliard ML and Petersson-Wolfe CS 2016. Technical note: The use of an accelerometer for measuring step activity and lying behaviors in dairy calves. *Journal of Dairy Science* 99, 9109-9113.
- Swennen Q, Verhulst PJ, Collin A, Bordas A, Verbeke K, Vansant G, Decuyper E and Buyse J 2007. Further investigations on the role of diet-induced thermogenesis in the regulation of feed intake in chickens: comparison of adult cockerels of lines selected for high or low residual feed intake. *Poultry Science* 86, 1960-1971.
- Szabo C, Babinszky L, Verstegen MWA, Vangen O, Jansman AJM and Kanis E 1999. The application of digital imaging techniques in the in vivo estimation of the body composition of pigs: a review. *Livestock Production Science* 60, 1-11.
- Tempelman RJ, Spurlock DM, Coffey M, Veerkamp RF, Armentano LE, Weigel KA, de Haas Y, Staples CR, Connor EE, Lu Y and VandeHaar MJ 2015. Heterogeneity in genetic and nongenetic variation and energy sink relationships for residual feed intake across research stations and countries. *Journal of Dairy Science* 98, 2013-2026.
- Thorup VM, Højsgaard S, Weisbjerg MR and Friggens NC 2013. Energy balance of individual cows can be estimated in real-time on farm using frequent liveweight measures even in the absence of body condition score. *Animal* 7, 1631-1639.
- Tixier-Boichard M, Bordas A, Renand G and Bidanel JP 2002. Residual food consumption as a tool to unravel genetic components of food intake. In 7th World congress on Genetics Applied to Livestock Production, 19-23/08/2002, Montpellier, France.
- Vallimont JE, Dechow CD, Daubert JM, Dekleva MW, Blum JW, Barlieb CM, Liu W, Varga GA, Heinrichs AJ and Baumrucker CR 2011. Short communication: Heritability of gross feed

- efficiency and associations with yield, intake, residual intake, body weight, and body condition score in 11 commercial Pennsylvania tie stalls. *Journal of Dairy Science* 94, 2108-2113.
- Veerkamp RF and Emmans GC 1995. Sources of genetic variation in energetic efficiency of dairy cows. *Livestock Production Science* 44, 87-97.
- Veerkamp RF, Emmans GC, Cromie AR and Simm G 1995. Variance components for residual feed intake in dairy cows. *Livestock Production Science* 41, 111-120.
- Veerkamp RF, De Haas Y, Pryce JE, Coffey MP, Spurlock DM and Vandehaar MJ 2015. Guidelines to measure individual feed intake of dairy cows for genomic and genetic evaluations. In *Proceedings of the ICAR Technical Meeting, 10-12/06/2015, Krakow, Poland*, pp. 191-198.
- Waltner SS, McNamara JP, Hillers JK and Brown DL 1994. Validation of indirect measures of body fat in lactating cows. *Journal of Dairy Science* 77, 2570-2579.
- Willems OW, Miller SP and Wood BJ 2013. Aspects of selection for feed efficiency in meat producing poultry. *World's Poultry Science Journal* 69, 77-88.
- Williams YJ, Pryce JE, Grainger C, Wales WJ, Linden N, Porker M and Hayes BJ 2011. Variation in residual feed intake in Holstein-Friesian dairy heifers in southern Australia. *Journal of Dairy Science* 94, 4715-4725.
- Xi YM, Wu F, Zhao DQ, Yang Z, Li L, Han ZY and Wang GL 2016. Biological mechanisms related to differences in residual feed intake in dairy cows. *Animal* 10, 1311-1318.
- Xu Z, Ji C, Zhang Y, Zhang Z, Nie Q, Xu J, Zhang D and Zhang X 2016. Combination analysis of genome-wide association and transcriptome sequencing of residual feed intake in quality chickens. *BMC Genomics* 17, 1-14.
- Yao C, Spurlock DM, Armentano LE, Page CD, VandeHaar MJ, Bickhart DM and Weigel KA 2013. Random Forests approach for identifying additive and epistatic single nucleotide polymorphisms associated with residual feed intake in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 96, 6716-6729.
- Yao C, de los Campos G, VandeHaar MJ, Spurlock DM, Armentano LE, Coffey M, de Haas Y, Veerkamp RF, Staples CR, Connor EE, Wang Z, Hanigan MD, Tempelman RJ and Weigel KA 2017. Use of genotype x environment interaction model to accommodate genetic heterogeneity for residual feed intake, dry matter intake, net energy in milk, and metabolic body weight in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 100, 2007-2016.
- Young JM and Dekkers JC 2012. The genetic and biological basis of residual feed intake as a measure of feed efficiency. In *Feed efficiency in swine* (ed. JF Patience), pp. 153-166, Wageningen Academic Publisher, Wageningen, The Netherlands.
- Young JM, Bergsma R, Knol EF, Patience JF and Dekkers JCM 2016. Effect of selection for residual feed intake during the grow/finish phase of production on sow reproductive performance and lactation efficiency. *Journal of Animal Science* 94, 4120-4132.
- Yuan J, Dou T, Ma M, Yi G, Chen S, Qu L, Shen M, Qu L, Wang K and Yang N 2015. Genetic parameters of feed efficiency traits in laying period of chickens. *Poultry Science* 94, 1470-1475.

Chapitre 2

Les questions et la stratégie de recherche

L'objectif de cette thèse est d'étudier la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire de la vache laitière pour pouvoir construire une stratégie visant à améliorer cette efficacité sans altérer les autres caractères d'intérêt en élevage. L'analyse bibliographique a montré que, pour y parvenir, l'estimation de cette variabilité interindividuelle se faisait couramment par l'étude de la variabilité de l'ingéré résiduel (IR), résidu d'un modèle des quantités ingérées, ou par l'efficacité de conversion alimentaire (ECA), ratio entre production laitière et quantités ingérées. La synthèse bibliographique a mis en avant que, bien que plus complexe, l'IR était à privilégier à l'ECA, car l'IR prend en compte différentes dépenses énergétiques présentant un intérêt en élevage comme produit économique ou qualité d'élevage. A l'inverse, les indicateurs de type ECA ne permettent pas de prendre en compte des caractères d'intérêt autres que la production laitière. Cet IR représente les quantités ingérées résiduelles après avoir retiré les quantités ingérées théoriques associées aux principaux besoins de la vache laitière. La synthèse bibliographique a permis d'identifier quatre verrous de connaissances à lever pour aborder cette question de l'IR pour les vaches laitières. Le premier est méthodologique et concerne la mesure des variations de réserves corporelles qui est un puits ou une source d'énergie important au cours de la lactation. Le second est lié à l'indicateur IR lui-même, qui inclut deux types d'erreur difficiles à séparer : les erreurs de mesure et d'ajustement du modèle d'une part et la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire d'autre part. Le troisième vise à étudier les facteurs, voire les mécanismes, qui pourraient être impliqués dans la variabilité de l'IR. Enfin, le dernier concerne la possibilité de phénotyper les individus les plus efficaces dans le cadre d'une sélection sur de grands effectifs, sans passer par une mesure des quantités ingérées, qui reste une mesure très largement réservée aux dispositifs expérimentaux. Pour aborder ces quatre questions de recherche, il est important de disposer d'un jeu de données expérimentales spécifiquement adapté.

I. Construction d'un dispositif expérimental adapté à l'étude des différences interindividuelles de l'efficacité alimentaire par la mesure de l'ingestion résiduelle

Un point déterminant de la variabilité de l'IR identifié dans l'analyse bibliographique est le choix de l'unité de mesure des quantités ingérées et le choix des variables explicatives du modèle (cf. Chapitre 1 I.a), ainsi que leur pression de mesure. A cet effet, une seule et unique définition de l'IR a été choisie dans le cadre de ce projet pour homogénéiser les résultats. De plus, un dispositif expérimental unique a été choisi pour éviter au maximum de confondre des

performances individuelles ou les effets liés au stade de lactation avec les effets liés à l'environnement. L'objectif de ce paragraphe est de définir la stratégie expérimentale et le calcul de l'IR qui sera utilisé comme estimation de « référence » dans notre projet.

a. Description des rations

Pour minimiser l'influence de l'environnement extérieur sur la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire, les vaches ont été logées en bâtiment et alimentées avec une seule et même ration complète pendant toute la lactation. L'expérimentation a été conduite simultanément sur deux sites expérimentaux : la ferme expérimentale de la Chambre d'agriculture du Maine-et-Loire, Les Trinottières, et l'installation expérimentale de l'UMR PEGASE, Méjusseume. Les deux troupeaux contenaient 59 vaches Holstein dont 27 primipares et 60 vaches Holstein dont 30 primipares, respectivement pour Les Trinottières et Méjusseume. La saison de vêlage était groupée pour les deux troupeaux et a duré 56 jours à Méjusseume et 93 jours aux Trinottières. La ration distribuée à Méjusseume était à base d'ensilage de maïs et de concentrés et valait 0,93 UFL/kg de MS et 101 g PDIE/UFL (Tableau 1). Aux Trinottières, deux rations complètes ont été utilisées : une distribuée à 30 vaches, à base d'ensilage de maïs et de concentrés avec 0,94 UFL/kg de matière sèche et 96 g PDIE/UFL et une distribuée aux 29 autres vaches, à base d'ensilage de maïs, d'ensilage d'herbe et de concentrés, plus riche en protéines digestibles que les deux autres rations avec 1 UFL/kg de MS et 110 g PDIE/UFL.

b. Le choix de l'unité des quantités ingérées : l'énergie nette

Contrairement à la plupart des études sur l'efficacité alimentaire chez la vache laitière, les QI utilisées pour le modèle de l'IR n'ont pas été exprimées en énergie brute ou en kg de matière sèche. L'expression des QI en kg de MS risque de biaiser l'estimation des QI à cause de l'évolution de la valeur alimentaire de la ration au cours de la lactation (Figure 1). Cette évolution est principalement liée à la valeur alimentaire des fourrages qui représentent une forte part de la ration et que l'on ne peut pas maîtriser. L'unité choisie pour les QI a donc été l'énergie nette. L'IR utilisé dans cette étude a donc été le REI.

Tableau 1 Composition, valeur énergétique nette (UFL) et protéines digestibles (PDIE) des rations distribuées sur toute la lactation aux 60 vaches Holstein de Méjusseume et aux 59 vaches Holstein des Trinottières.

	Méjusseume	Les Trinottières	
		Bas	Haut
Nombre de vaches	30 P + 30 M	14P + 16M	13P + 16M
Composition (% MS de la ration)			
Ensilage maïs	64,7	71	41,8
Ensilage herbe	0	0	20
Paille	0	3	0
Concentrés énergie	13,5	0	0
Tourteau soja	10,5	0	20
Tourteau colza	0	25	0
Luzerne déshydratée	10	0	0
Maïs humide	0	0	8,3
Pulpe betteraves	0	0	8,3
Minéraux	1,3	1	1,6
Valeur alimentaire			
UFL/kgDM	0,93	0,94	1,00
PDIE/kgDM	94,30	90,1	110,5

P = primipares ; M = multipares ; UFL = unité fourragère lait correspondant à l'énergie nette du lait, 1 UFL = 7,12 MJ d'énergie nette pour le lait ; PDIE = protéines digestibles, MS = matière sèche.

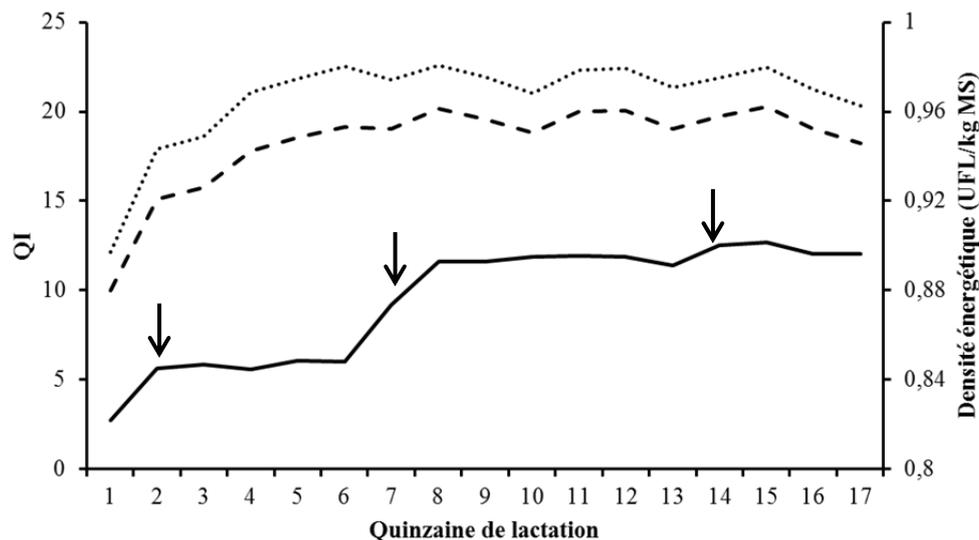


Figure 1 Evolution des quantités ingérées (QI) exprimées en kg de matière sèche (.....) ou en énergie nette (UFL, ----) et de la densité énergétique (—) au cours de la lactation pour une vache du troupeau. Les flèches (↓) indiquent les changements de silo pour l'ensilage de maïs.

c. Le choix des variables explicatives du modèle utilisé pour estimer le REI

Les variables explicatives retenues dans le modèle pour estimer le REI sont les variables associées aux dépenses énergétiques représentant un enjeu pour l'élevage, soit comme produit économique, soit comme qualité d'élevage. Les dépenses énergétiques identifiées comme un produit sont l'énergie nette du lait et l'entretien, qui sont associés à des produits directs en élevage : le lait produit et le gabarit de la vache (poids carcasse et poids des veaux). Un troisième poste de dépense ou apport énergétique, qui est souvent discuté dans la bibliographie parce qu'il n'est pas un produit direct mais contribue à la qualité d'élevage, est la variation des réserves corporelles. Comme mis en évidence dans l'analyse bibliographique, ce dernier poste est important à prendre en compte car il permet à la vache de gérer les écarts entre apports et besoins au cours de la lactation et présente des variations interindividuelles importantes. Une trop forte variation des réserves corporelles est associée à un risque accru de troubles métaboliques et une fertilité détériorée. La prise en compte des réserves corporelles dans le modèle est donc essentielle pour maintenir une bonne qualité d'élevage. De plus, comme l'énergie associée à la perte de réserves corporelles est inférieure à l'énergie associée à la même variation de gain de réserves corporelles, il est important de distinguer gain et perte de réserves corporelles. Au final, le REI a été calculé comme le résidu de la régression linéaire de l'énergie nette ingérée en fonction des dépenses associées à la synthèse de lait, l'entretien, la perte et le gain de réserves corporelles.

d. La définition de la fréquence et des méthodes de mesure

L'ensemble des variables a été mesuré aussi fréquemment que possible par les dispositifs en place dans les installations expérimentales et avec des méthodes de mesure aussi directes que possibles (Figure 2). Les QI ont donc été mesurées individuellement quotidiennement par différence entre la quantité offerte et la quantité refusée du lendemain matin. Comme les fourrages ont une valeur alimentaire changeante au cours du temps, notamment leur teneur en eau, la matière sèche a été analysée cinq fois par semaine pour chacun des fourrages de la ration. Pour les concentrés, la matière sèche a été analysée une fois par semaine à Méjusseaume et une fois tous les deux mois aux Trinottières. Les dépenses associées à la synthèse de lait ont été estimées à partir de l'équation de l'énergie nette du lait établie dans INRA (2010). Les données utilisées sont des données quotidiennes de volume de lait produit et des données bihebdomadaires de composition du lait en matière grasse et protéique. Les dépenses associées à l'entretien ont été estimées à partir du poids vif métabolique avec des

données de poids vif quotidiennes mesurées en sortie de traite le matin. Les variations de réserves corporelles ont été estimées à partir des données de note d'état corporel (NEC) mensuelles à Méjusseaume ou bimensuelles aux Trinottières. Ces notes d'état corporel ont été lissées par une spline pour avoir des NEC quotidiennes. La variation quotidienne de ces NEC a été extraite et séparée en gain et en perte.

Un problème soulevé dans l'analyse bibliographique est la répétabilité modérée du REI au cours de la lactation. A cet effet, les variables du modèle ont été moyennées sur la lactation pour l'énergie nette ingérée, l'énergie nette du lait et le poids vif métabolique et cumulées sur la lactation pour la perte et le gain de NEC. Ces variations de NEC ont ensuite été multipliées par le poids vif moyen de la lactation de l'individu pour corriger des différences de gabarit existantes pour une même variation de NEC.

Au final, le REI utilisé comme « référence » dans ce projet de thèse est défini d'après le modèle 1 ci-dessous.

$$ENI_j = \mu + a \times EN_{\text{lait}}_j + b \times (PV^{0,75})_j + c \times (PV_j \times \Delta NEC^+_j) + d \times (PV_j \times \Delta NEC^-_j) + REI_j \quad (1)$$

avec μ l'ordonnée à l'origine, a, b, c et d les coefficients de la régression, ENI_j (UFL/j) l'énergie nette ingérée moyenne de la lactation de la vache j, PV_j (kg) le poids vif moyen de la lactation de la vache j, ΔNEC^+_j le cumul sur la lactation du gain de NEC pour la vache j, ΔNEC^-_j le cumul sur la lactation de la perte de NEC pour la vache j et REI_j (UFL/j) le résidu du modèle pour la vache j.

II. Objectif 1 : Améliorer la méthode de phénotypage de la variation des réserves corporelles

La synthèse bibliographique du chapitre précédent a mis en évidence la difficulté pour interpréter la variabilité du REI. Cette difficulté est principalement liée d'une part à la variabilité des composantes biologiques prises en compte dans le modèle pour estimer le REI et d'autre part à une apparente sensibilité du REI à la fréquence et à la précision des méthodes de mesure utilisées. L'utilisation de méthodes de mesure précises et utilisables fréquemment est donc essentielle pour pouvoir interpréter la variabilité du REI comme de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire. Un frein majeur identifié dans l'analyse bibliographique est la mesure de la variation des réserves corporelles. La méthode couramment utilisée pour estimer la variation des réserves corporelles n'est pas utilisable à haut débit et avec précision. La synthèse bibliographique a également montré de récentes avancées en matière de technologies d'imagerie utilisées pour estimer la NEC. Ces méthodes

manquent pour l'instant de précision et de répétabilité pour pouvoir être utilisées en routine. A cet effet un premier objectif a été d'améliorer l'estimation de l'état des réserves corporelles de la vache laitière en développant une notation d'état corporel automatique.

Methodologie

Cette méthode a été initiée en partie durant mon stage de fin d'études de master et a été automatisée et testée en routine durant le début de la thèse. Ce travail a pour objectif de développer et valider une estimation automatique de la note d'état corporel des vaches laitières Holstein à partir de l'analyse de forme tridimensionnelle (3D) du bassin de la vache. Un jeu de calibration et un jeu de validation ont été constitués avec des vaches de l'installation expérimentale de l'UMR PEGASE de Méjusseume. Des images 3D du bassin de la vache et les mesures de NEC associées ont été collectées. La réalisation de ce projet a bénéficié de la collaboration de T. Luginbühl, L. Delattre et J.M. Delouard (3D Ouest, Lannion, France) qui sont experts en nouvelles technologies, notamment en acquisition, analyse et traitement d'images. Cette collaboration a été essentielle au projet, notamment pour la partie développement informatique et technologique. L'objectif est de faire la preuve du concept et la faisabilité de cette méthodologie, qui sont deux étapes en amont de la commercialisation du produit dans le processus d'innovation, en testant un prototype. Les différentes étapes de l'élaboration de cette méthodologie nouvelle et de sa validation seront décrites dans le chapitre 3.

III. Objectif 2 : Estimer la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire avec le REI de façon plus robuste

La synthèse bibliographique a mis en évidence une forte variabilité de la variabilité du REI entre études. La forte variabilité des périodes de mesure utilisées au cours de la lactation et la répétabilité modérée du REI intra-lactation justifient sans doute la forte variabilité observée dans la bibliographie. La synthèse bibliographique suggérait également que cette différence de variabilité du REI était associée à la diversité des fréquences de mesures et de la précision des méthodes de mesure utilisées. L'ensemble des erreurs de mesure et d'ajustement du modèle se retrouve dans les résidus du modèle, i.e. dans le REI. Un second objectif de la thèse a donc été de rendre l'estimation de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire par le REI plus robuste : d'une part en définissant la période de lactation à utiliser comme

référence pour aboutir à une estimation non biaisée et stable du REI et d'autre part en isolant la part de la variabilité du REI qui est liée à l'individu et moins aux erreurs.

Méthodologie

Les données utilisées sont celles issues de l'expérimentation décrite dans la partie précédente, pour les 238 premiers jours de lactation, qui est le nombre de jours communs aux 119 vaches. Pour identifier une période de mesure de référence du REI au cours de la lactation, le REI a été estimé sur des sous-périodes de lactation. Les REI obtenus par sous-période ont ensuite été comparés au REI estimé sur la totalité de la période, i.e. les 238 premiers jours de lactation.

L'estimation de la part individuelle de la variabilité du REI a été abordée avec un modèle mixte avec des coefficients de régression individu-spécifiques. La part de l'énergie nette ingérée prédite par la part aléatoire du modèle a été interprétée comme le part individuelle de la variabilité du REI.

Pour mener à bien ces deux tâches, cette partie de la thèse a été conduite en collaboration avec un généticien (D. Berry, Teagasc, Irlande) et un modélisateur (N.C. Friggens, INRA, France) afin de bénéficier de leur expertise pour la conception et l'interprétation des modèles mixtes. Cette collaboration a fait l'objet d'une mission d'un mois en Irlande pour travailler et analyser les données. Ce travail sur la variabilité interindividuelle de l'efficacité fait l'objet du chapitre 4 de cette thèse.

IV. Objectif 3 : Identifier les facteurs biologiques associés aux différences interindividuelles d'efficacité alimentaire

L'identification des facteurs biologiques expliquant les différences interindividuelles d'efficacité alimentaire des vaches laitières est aujourd'hui vue comme une alternative pour améliorer l'efficacité alimentaire. Les travaux déjà réalisés chez la vache laitière sont peu nombreux et ne se focalisent que sur quelques facteurs biologiques potentiels. Par ailleurs, il n'est pas possible de disposer de lignées divergentes pour le REI pour étudier les différents mécanismes impliqués. La compréhension de la variabilité de l'efficacité alimentaire doit se faire à l'échelle de l'ensemble des fonctions biologiques et non uniquement sur quelques-unes de ces fonctions. En effet, l'efficacité alimentaire est la combinaison de plusieurs caractères qui ne sont pas forcément indépendants les uns des autres. Un dernier objectif a donc été de mieux comprendre les facteurs biologiques associés à la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire. Ces facteurs incluent notamment un maximum des caractères

impliqués dans la valorisation ou la transformation de l'énergie ingérée, qui sont donc susceptibles d'expliquer des variations de l'efficacité alimentaire.

Méthodologie

Pour identifier les facteurs biologiques associés aux différences d'efficacité alimentaire chez la vache laitière, la stratégie a été de mesurer autant de facteurs candidats identifiés dans la synthèse bibliographique que possible pour chaque vache des essais mis en place pour estimer l'efficacité alimentaire (cf. partie I ci-dessus). Chez la vache laitière, les facteurs biologiques associés à des différences d'efficacité alimentaire regroupent des variables décrivant les performances digestives et fermentaires, l'activité physique, le comportement alimentaire, l'entretien et les variations de réserves corporelles. L'ensemble de ces performances a été mesuré pour les 60 vaches de l'installation expérimentale de Méjusseume, en plus des phénotypes déjà mesurés individuellement pour estimer le REI (Figure 2). Un monitoring à haut débit a été réalisé pour la majorité de ces performances grâce à l'utilisation de nouveaux outils de phénotypage (cf. chapitre 1, III.c). La méthodologie employée pour chacune de ces performances est décrite dans les paragraphes ci-dessous. La contribution de chacun de ces facteurs, pris individuellement et pris simultanément avec les autres, à la variabilité interindividuelle du REI et de l'EN ingérée a été estimée.

- Performances digestives et fermentaires

Les performances digestives et fermentaires ont été approchées par la digestibilité de la MS et par la température ruminale. La digestibilité de la MS nécessite l'estimation des quantités de fèces excrétées par la vache. Cette quantité excrétée a été mesurée avec une approche indirecte proposée par R. Delagarde dans le cadre du travail de L. Denouel (2016), car la méthode de référence nécessite des collectes totales individuelles de fèces sur plusieurs jours et n'est donc pas adaptée pour un grand effectif. La méthode indirecte est une méthode à l'origine utilisée pour estimer les QI au pâturage (Delagarde *et al.*, 2010). Elle est basée sur le dosage d'un marqueur indigestible, l'ytterbium (YbCl₃), qui est fixé sur des bouchons de cellulose et distribué en quantité égale deux fois par jour au début du repas pendant 14 jours consécutifs. Un échantillon de fèces a été collecté une fois le matin et une fois le soir sur les cinq derniers jours de la période pour chaque vache. L'ytterbium a été dosé dans l'échantillon moyen des fèces collectées. En combinant la concentration fécale en ytterbium avec la quantité totale connue d'ytterbium excrétée, on peut estimer la quantité de fèces excrétée en moyenne sur les cinq derniers jours de la période. Cette mesure a été réalisée deux fois par

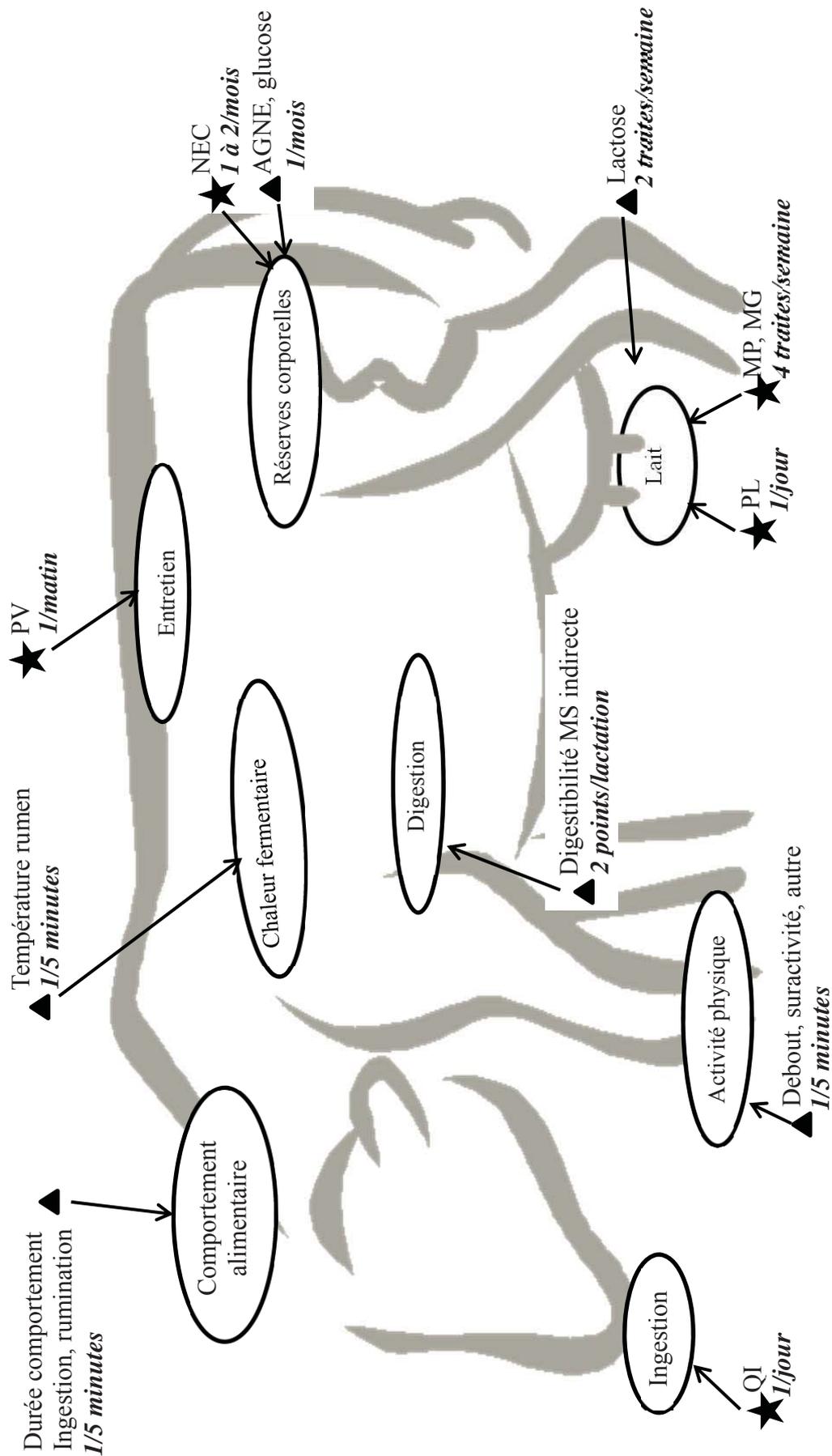


Figure 2 Récapitulatif des mesures et fréquence de mesure réalisées pour chacune des 60 vaches Holstein suivies à l'installation expérimentale de Méjusseume. Les variables sont soit utilisées pour estimer l'ingéré résiduel (★), soit pour expliquer les différences d'ingéré résiduel (▲).

vache, à raison de deux périodes consécutives de 14 jours.

La température ruminale est une information biologique complexe. Elle permet tout d'abord de suivre les problèmes sanitaires des vaches (hyperthermies) ou d'autres événements comme l'approche de la mise-bas, grâce à des thermobolus qui sont commercialisés d'abord dans ce but. La température ruminale traduit aussi les variations intra-jour de la température liées à la prise alimentaire via les cinétiques de chaleur des fermentations ruminales des repas et les cinétiques de boisson qui provoquent des baisses rapide de la température. Cette température ruminale a été mesurée à haut débit toutes les cinq minutes pour chaque vache sur toute la lactation par un thermobolus ruminal, le San'Phone[®] (Medria, Châteaubourg, France). Ce capteur mesure en continu deux températures : la température brute du rumen et la température corrigée de l'effet boisson de façon à refléter la température corporelle.

- *L'activité physique et le comportement alimentaire*

Chaque vache a été équipée d'un accéléromètre placé sur un collier porté au niveau du cou, le Feed'Phone[®] (Medria, Châteaubourg, France). Ce capteur mesure à la fois la position debout ou couchée de la vache et le comportement de la vache. Ce comportement est caractérisé en cinq activités : ingestion, rumination, repos, suractivité et le reste qui ne rentre pas dans les quatre premières catégories. Ce capteur renseigne toutes les cinq minutes la position de la vache (debout ou couché) et l'activité dominante parmi les cinq activités mesurées des cinq minutes d'enregistrement. Ces mesures ont ensuite été converties en durée journalière passée à chacune des 5 activités et en durée passée debout.

- *Les variations de réserves corporelles*

Les variations des réserves corporelles ont été mesurées par les variations de NEC et prises en compte dans l'estimation du REI. D'autres facteurs ont été mesurés pour vérifier que les variables utilisées dans l'estimation du REI décrivent bien toute la variabilité de l'énergie nette ingérée associée aux variations des réserves corporelles. Ces autres facteurs mesurés étaient des paramètres sanguins de la mobilisation des réserves corporelles : les concentrations sanguines en acides gras non estérifiés (AGNE) et en glucose. Ces facteurs ont été dosés à partir d'échantillons prélevés après la traite du matin par prise de sang caudale chaque mois et à stades physiologiques fixes. Par ailleurs, les variables utilisées dans l'estimation du REI ne décrivent pas vraiment les différences de cinétique de NEC pouvant exister entre vaches mais décrivent juste la quantité mobilisée et reconstituée sur la lactation. Le nombre de changements de sens de la cinétique de la NEC au cours de la lactation a donc

été extrait pour vérifier si des différences de cinétique de la NEC expliquent des différences de REI.

Toute cette approche destinée à l'étude des déterminants de la variabilité de l'IR entre vaches est présentée dans le chapitre 5 de cette thèse.

V. Objectif 4 : Construire un indicateur indirect de l'efficacité alimentaire sans les mesures des quantités ingérées

Le principal frein à l'amélioration de l'efficacité alimentaire chez la vache laitière reste la difficulté de sa mesure à haut débit et pour un grand effectif. Le facteur limitant de cette mesure est l'accès aux QI individuelles, car elles ne sont accessibles que dans certaines installations expérimentales. Le développement d'un indicateur indirect de l'efficacité alimentaire utilisable à haut débit constituerait une avancée importante. L'objectif a donc été de profiter de ce dispositif important de phénotypage pour essayer de construire un indicateur indirect du REI, qui ne nécessiterait pas la mesure des QI et qui serait uniquement basé sur des mesures accessibles aujourd'hui ou demain en élevage.

Méthodologie

Nous avons formulé l'hypothèse que pour une même ration, l'efficacité de l'eau bue pouvait constituer un reflet de l'efficacité alimentaire de la vache, notamment parce que les variations d'eau bue sont très liées à celles des quantités de MS ingérées intra-ration (Khelil-Arfa *et al.*, 2012). Les données utilisées sont celles collectées en continu à Méjusseume sur les 60 vaches suivies à la fois pour estimer le REI (cf. partie I ci-dessus) et pour l'ensemble des potentiels facteurs de variation du REI (cf. partie IV ci-dessus). L'efficacité de l'eau bue a été calculée comme le résidu de la régression linéaire de l'eau bue en fonction de la production laitière et du poids vif, qui sont les principales variables explicatives de l'eau bue intra-ration (Khelil-Arfa *et al.*, 2012). L'eau bue par vache n'est pas accessible directement en élevage. Un indicateur indirect de l'eau bue a été construit pour estimer l'eau bue par chaque vache à partir de la variabilité de la température ruminale (Bewley *et al.*, 2008). Cet indicateur a été défini comme le cumul journalier de l'écart entre la température corrigée et la température brute. Le REI sera donc comparé à l'efficacité de l'eau bue, uniquement estimée à partir de données accessibles en élevage demain : la production laitière, le poids vif et la température ruminale.

Cette étude très prospective est présentée dans le chapitre 6 de la thèse.

VI. Organisation du manuscrit de thèse

En résumé, l'organisation du manuscrit découle de l'organisation et des interactions entre les sous-objectifs de la thèse. Le manuscrit est donc scindé en 4 parties : le chapitre 3 sur l'automatisation de la notation d'état corporel, le chapitre 4 sur l'estimation de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire par le REI, le chapitre 5 sur l'identification des facteurs biologiques associés à la variabilité de l'efficacité alimentaire et le chapitre 6 sur la construction d'un indicateur indirect du REI (Figure 3). Le chapitre 4 comporte deux parties : une pour identifier la période de mesure au cours de la lactation et une pour isoler la part individu-spécifique dans la variabilité du REI.

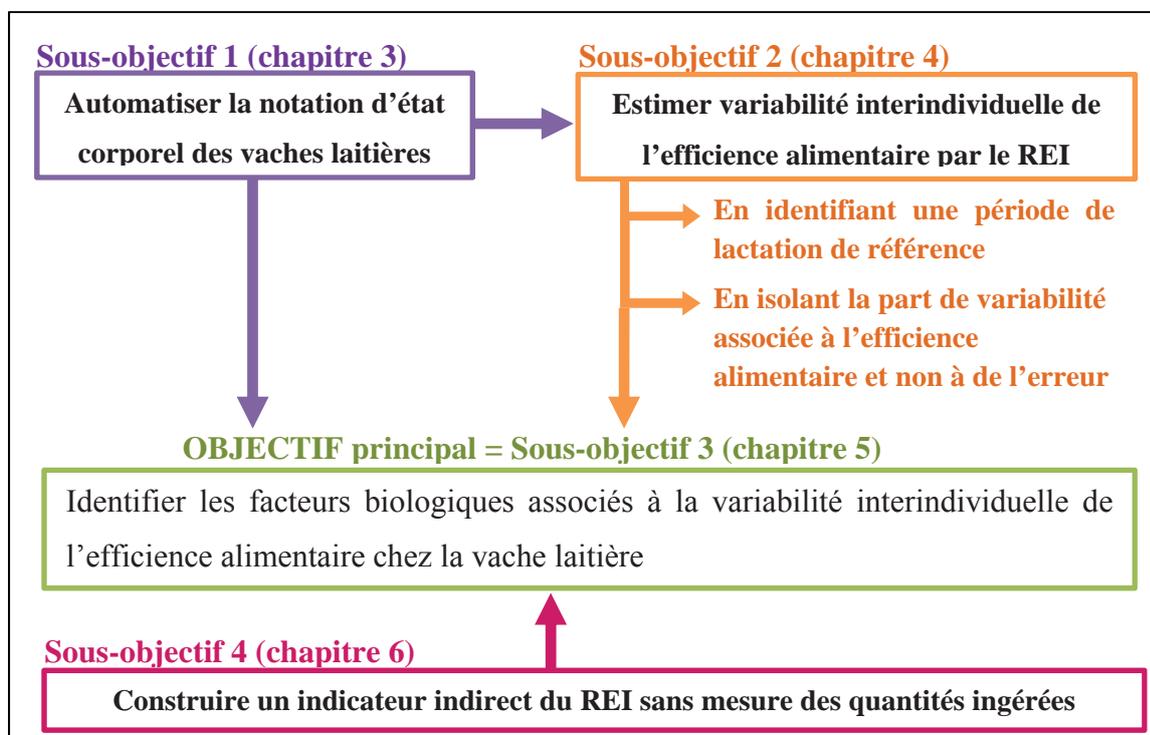


Figure 3 Structure du projet de recherche découpé en ses 4 sous-objectifs et organisation du manuscrit.

Références

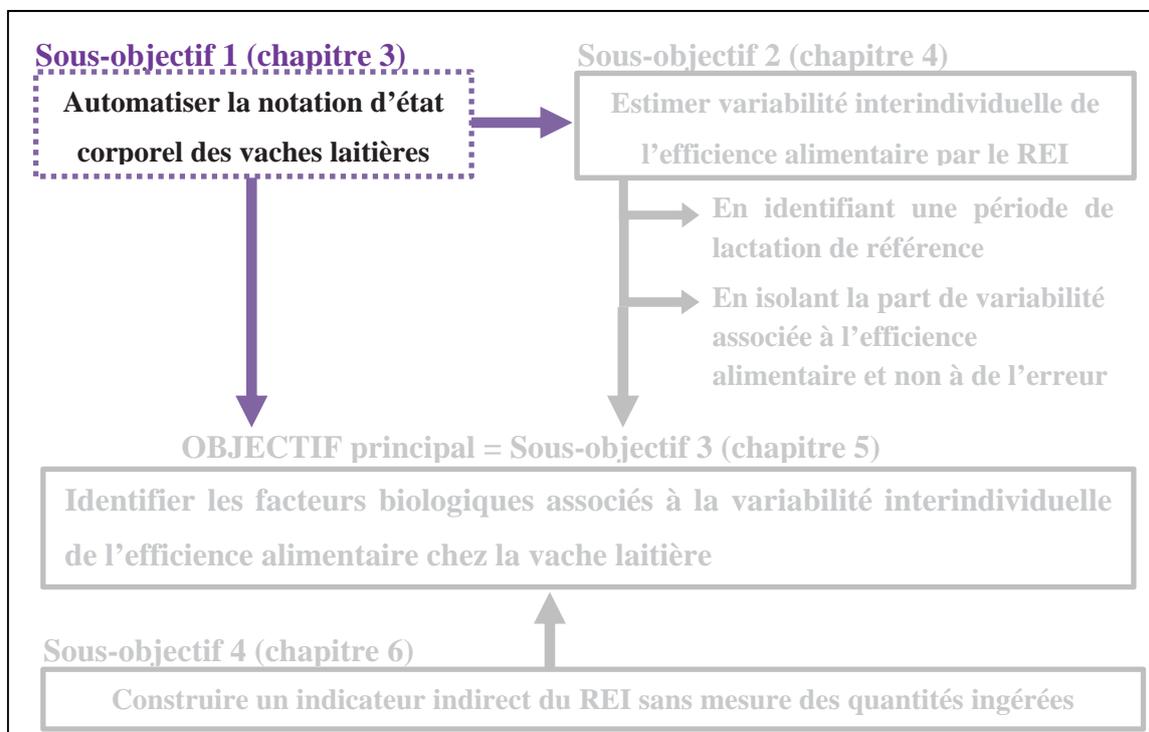
Bewley JM, Grott MW, Einstein ME and Schutz MM 2008. Impact of intake water temperatures on reticular temperatures of lactating dairy cows. Journal of dairy science 91, 3880-3887.

- Delagarde R, Pérez-Ramírez E and Peyraud JL 2010. Ytterbium oxide has the same accuracy as chromic oxide for estimating variations of faecal dry matter output in dairy cows fed a total mixed ration at two feeding levels. *Animal Feed Science and Technology* 161, 121-131.
- Denouel L 2016. Phénotypage de la digestibilité à l'échelle du troupeau par l'ytterbium chez la vache laitière. For Master degree (Supervised by R Delagarde), Agrocampus-Ouest, Rennes, France.
- Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) 2010. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeurs des aliments: tables Inra 2007 mise à jour 2010. Quae, Versailles, France.
- Khelil-Arfa H, Boudon A, Maxin G and Faverdin P 2012. Prediction of water intake and excretion flows in Holstein dairy cows under thermoneutral conditions. *Animal* 6, 1662-1676.

Chapitre 3

Amélioration de la méthode de mesure d'un phénotype d'intérêt pour estimer l'efficacité alimentaire des vaches laitières : l'état corporel.

Automatisation de la mesure de la note d'état corporel



La variabilité de l'ingéré résiduel comme indicateur de la variabilité de l'efficacité alimentaire est sujet à la qualité et la fréquence de mesures des variables utilisées pour l'estimer. Ainsi l'utilisation de méthodes de mesure non utilisables à haut débit ou pas assez précises augmenterait la part de l'ingéré résiduel associée à de l'erreur et par conséquent réduirait celle associée à la véritable efficacité alimentaire.

La variation des réserves corporelles est considérée comme un phénotype essentiel à comptabiliser dans l'estimation de l'efficacité alimentaire car les réserves corporelles constituent une source (une dépense) importante d'énergie chez la vache laitière en début (fin) de lactation. Cependant la méthode couramment utilisée n'est pas assez précise et sensible, notamment pour détecter les rapides variations de début de lactation. En effet, la méthode consiste à noter chaque vache selon une grille de notation par palpation ou visuellement. En améliorant l'estimation de l'état corporel de la vache laitière et par conséquent l'estimation des variations d'état des réserves corporelles au cours de la lactation, la part de l'ingéré résiduel associée à des erreurs de mesures devrait se réduire.

C'est dans cette optique que s'inscrit le présent chapitre dont l'objectif est de développer et de valider une estimation automatique de la note d'état corporel de la vache laitière par l'analyse de forme de la surface 3D du bassin. L'automatisation permettra non seulement de réaliser des séries de notations à haut débit, mais en plus de rendre la notation objective et comparable inter-troupeaux pour une même race. A cet effet ce chapitre est coupé en deux parties : une première partie présentant la preuve du concept, avec une étape restant manuelle : l'extraction de points caractéristiques de chaque image 3D, et une seconde partie sur l'automatisation de l'extraction de ces points.

L'estimation automatisée de la note d'état corporel des vaches laitières Holstein par analyse de forme de l'image tridimensionnelle du bassin de la vache

A. Fischer, T. Luginbühl, L. Delattre, J. M. Delouard et P. Faverdin

Résumé

L'état corporel est une estimation indirecte du niveau des réserves corporelles dont les variations reflètent la variation du bilan énergétique cumulé. Elles conditionnent les performances de reproduction et la santé de l'animal, importantes à prendre en compte en élevage laitier mais difficiles à mesurer à haut débit. La note d'état corporel (NEC) est couramment utilisée mais est chronophage, subjective et pas assez sensible pour du monitoring.

L'objectif était de développer et de valider l'estimation de la NEC par imagerie tridimensionnelle (3D) du bassin de la vache. Le capteur 3D était placé à 2 m du sol à l'entrée de la stalle de pesée en sortie de traite. La NEC était notée par trois experts le même jour que les acquisitions d'images 3D. Quatre points anatomiques sont identifiés manuellement sur chaque surface-3D pour définir un repère centré sur le bassin de la vache. Pour la calibration, 57 surfaces-3D de 56 vaches Holstein ont été sélectionnées pour couvrir une large gamme de NEC (0,5 à 4,75 pour une grille de 0 à 5). La NEC est estimée par régression linéaire multiple des coordonnées de ces surfaces-3D sur les composantes principales issues d'une analyse en composantes principales. La validation externe est analysée d'une part sur des vaches déjà utilisées pour la calibration, mais à un stade de lactation différent, et d'autre part sur des vaches externes à la calibration. Six vaches ont été scannées une fois et leurs surfaces traitées huit fois de suite pour estimer la répétabilité. Ces six vaches ont aussi été scannées 8 fois chacune le même jour pour estimer la reproductibilité.

La méthode est parfaitement calibrée sur la NEC, et la validation externe est caractérisée par une erreur équivalente à la reproductibilité de la NEC de référence (RMSE= 0,31 pour les vaches déjà utilisées pour la calibration ; 0,32 pour les vaches hors calibration). La NEC par imagerie 3D est 3 fois plus répétable (erreur standard = 0,075 versus 0,21 pour NEC) et 2,8 fois plus reproductible que la méthode manuelle (erreur standard = 0,103 versus 0,28 pour NEC). L'erreur de prédiction est similaire entre les deux populations de validation : la méthode n'est pas moins efficace pour les vaches hors calibration. La majorité de l'erreur de reproductibilité est expliquée par la répétabilité de la méthode. L'automatisation de l'extraction des quatre points donne une erreur de validation externe plus grande (erreur

standard = 0,27 pour les vaches hors calibration) et une NEC-3D moins reproductible (erreurs standard = 0,20) que la méthode NEC-3D avec identification manuelle des points. L'utilisation à haut débit de cette méthode entièrement automatique va permettre de réduire les erreurs d'estimation de la NEC-3D et ainsi d'avoir des mesures plus fines des variations des réserves corporelles. L'estimation de la NEC par imagerie 3D couplée à l'analyse en composante principale ressort comme un outil encourageant pour améliorer la précision et la faisabilité du monitoring de ce trait à haut débit.

I. La preuve du concept¹

Rear shape in 3 dimensions summarized by principal component analysis is a good predictor of body condition score in Holstein dairy cows

Le bassin en 3 dimensions résumé par analyse en composantes principales est un bon prédicteur de la note d'état corporel des vaches laitières Prim'Holstein

A. Fischer, T. Luginbühl, L. Delattre, J. M. Delouard et P. Faverdin

Original Research Article – Journal of Dairy Science 98:4465-4476

¹ Ce chapitre a été publié dans Journal of Dairy Science. Ces résultats ont également été

- Publiés dans un journal à comité de relecture :

Fischer A, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2014d. Améliorer la mesure de l'état des réserves corporelles des vaches laitières en analysant la surface 3D du dos de la vache. In 21ème Rencontres Recherches Ruminants, 03-04/12/2014, Paris, France, pp. 23-26.

Fischer A, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2015b. Rear shape in 3 dimensions summarized by principal component analysis is a good predictor of body condition score in Holstein dairy cows. Journal of dairy science 98, 4465-4476.

- Récompensés par le EAAP-Novus International Travel Award à l'EAAP 2014 dans la session « young scientist ». Ce prix incluait la visite de Novus International à St-Louis et la participation au congrès ADSA-ASAS JAM à Orlando en 2015 en tant qu'invitée.

- Communiqués oralement dans d'autres manifestations scientifiques :

Fischer A, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2015a. Analyzing the rear shape of dairy cows in 3D to better assess body condition score. In ADSA-ASAS Joint Annual Meeting, 12-17/07/2015, Orlando, USA, p. 814.

Fischer A, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2014d. Améliorer la mesure de l'état des réserves corporelles des vaches laitières en analysant la surface 3D du dos de la vache. In 21ème Rencontres Recherches Ruminants, 03-04/12/2014, Paris, France, pp. 23-26.

Fischer A, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2014a. Analyzing the back of dairy cows in 3D imaging to better assess body condition. In 65th Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), 25-29/08/2014, Copenhagen, Denmark, p. 127.

Fischer A, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2014b. L'imagerie 3D pour évaluer l'état corporel des vaches laitières. In XIIIème journées de l'animation transversale "Glande mammaire, Lait", 20-21/11/2014, Rennes, France.

- Communiqués sous forme de poster :

Fischer A, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2014c. The rear's 3D shape summarized by principal component analysis predicts well body condition score in Holstein dairy cows. In 1st DairyCare conference, 22-23/08/2014, Copenhagen, Denmark, p. 41.



J. Dairy Sci. 98:4465–4476

<http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8969>

© American Dairy Science Association®, 2015.

Rear shape in 3 dimensions summarized by principal component analysis is a good predictor of body condition score in Holstein dairy cows

A. Fischer,*†‡ T. Luginbühl,§ L. Delattre,§ J. M. Delouard,§ and P. Faverdin*†²

*INRA, UMR 1348 PEGASE, F-35590 St-Gilles, France

†Agrocampus-Ouest, UMR1348 PEGASE, F-35000 Rennes, France

‡Institut de l'élevage, F-35650 Le Rheu, France

§3DOuest Lannion, F-22300 Lannion, France

Abstract

Body condition is an indirect estimation of the level of body reserves, and its variation reflects cumulative variation in energy balance. It interacts with reproductive and health performance, which are important to consider in dairy production but not easy to monitor. The commonly used body condition score (BCS) is time consuming, subjective, and not very sensitive. The aim was therefore to develop and validate a method assessing BCS with 3-dimensional (3D) surfaces of the cow's rear. A camera captured 3D shapes 2 m from the floor in a weigh station at the milking parlor exit. The BCS was scored by 3 experts on the same day as 3D imaging. Four anatomical landmarks had to be identified manually on each 3D surface to define a space centered on the cow's rear. A set of 57 3D surfaces from 56 Holstein dairy cows was selected to cover a large BCS range (from 0.5 to 4.75 on a 0 to 5 scale) to calibrate 3D surfaces on BCS. After performing a principal component analysis on this data set, multiple linear regression was fitted on the coordinates of these surfaces in the principal components' space to assess BCS. The validation was performed on 2 external data sets: one with cows used for calibration, but at a different lactation stage, and one with cows not used for calibration. Additionally, 6 cows were scanned once and their surfaces processed 8 times each for repeatability and then these cows were scanned 8 times each the same day for reproducibility. The selected model showed perfect calibration and a good but weaker validation (root mean square error = 0.31 for the data set with cows used for calibration; 0.32 for the data set with cows not used for calibration). Assessing BCS with 3D surfaces was 3 times more repeatable

² Received October 13, 2014. Accepted March 29, 2015.
Corresponding author: philippe.faverdin@rennes.inra.fr

(standard error = 0.075 versus 0.210 for BCS) and 2.8 times more reproducible than manually scored BCS (standard error = 0.103 versus 0.280 for BCS). The prediction error was similar for both validation data sets, indicating that the method is not less efficient for cows not used for calibration. The major part of reproducibility error incorporates repeatability error. An automation of the anatomical landmarks identification is required, first to allow broadband measures of body condition and second to improve repeatability and consequently reproducibility. Assessing BCS using 3D imaging coupled with principal component analysis appears to be a very promising means of improving precision and feasibility of this trait measurement.

Key words: body condition score, 3-dimensional imaging, principal component analysis, precision livestock farming

Introduction

Body condition assesses body reserves and is often used as an indirect indicator of reproduction and health status in dairy cattle management. Thin or fat cows are commonly known to be less efficient in reproduction with reduced success at first AI, longer calving-to-calving interval, and earlier return to heat cycles (Dechow et al., 2002; Berry et al., 2003). In the same way, body condition is correlated with health status (Ruegg and Milton, 1995), but the strength of this association depends on the disease (Roche and Berry, 2006). Genetic selection enhances the genetic production potential of the dairy herd but weakens its reproductive and health performance. Improving the reproductive and health status of dairy cows while maintaining production is a central issue in dairy husbandry and justifies an increasing interest in body condition phenotyping (Coffey et al., 2003; Pryce and Harris, 2006).

Major concern for selection is the difficulty in achieving accurate, objective, and high-throughput measurement of body condition in dairy cows. Body reserves can be recorded either directly by measuring the quantity of body lipids after slaughtering animals, or indirectly by measuring traits which are highly correlated with lipid levels. Whole-body dissection is time-consuming, cumbersome, expensive, and irreversible for broadband use (Szabo et al., 1999). Assessing body reserves indirectly has been largely analyzed: methods can be precise but time-consuming, expensive, and invasive, such as measuring adipocyte diameter or diffusion space of deuterated water (Waltner et al., 1994). An imaging technique using ultrasonography offers new perspectives for achieving repeatable and noninvasive

measures of body reserves, though they are not high-throughput methods (Schröder and Staufienbiel, 2006). On the farm, body condition is usually based on scoring, visually or by palpation, specific anatomic areas according to a chart. Body condition score appears as the cheapest and most practical method, though it suffers from its subjectivity and low reproducibility for an individual monitoring. Small and rapid variations of body condition occur during the first half of lactation in dairy cows. However, these variations are hardly detected because scores for the same cow vary between scorers (Kristensen et al., 2006) and are not sufficiently reproducible (Pryce et al., 2014).

Imaging technologies have recently become more affordable and their image quality and precision justify potential on-farm application. Therefore, few research groups (Ferguson et al., 2006; Bewley et al., 2008; Halachmi et al., 2008, Negretti et al., 2008; Azzaro et al., 2011; Bercovich et al., 2013; Weber et al., 2014) have attempted to automate BCS to achieve a more objective and less time-consuming method. Directly scoring body condition on 2-dimensional (**2D**) images is as efficient as standard BCS, but is still as subjective and labor consuming as the latter (Ferguson et al., 2006). Subsequently developed indirect methods aimed at reducing time and labor consumption of body condition monitoring. The first step was to build an acquisition system capable of acquiring high-quality images at an affordable price and not too sensitive to environmental changes. The second step was to define the information to be extracted from images to be used to assess BCS. Methods developed by Bewley et al. (2008), Halachmi et al. (2008), and Negretti et al. (2008) did not use whole information kept in 2D images but extracted indicators they assumed to be sensitive to BCS variation, such as angles, areas, or 2D shape of the rear.

Instead of using partial characteristics of the shape and keeping the rear shape in the common 2D space, Azzaro et al. (2011) and Bercovich et al. (2013) dealt with whole information kept in the rear shape. Azzaro et al. (2011) used principal component analysis (**PCA**) and Bercovich et al. (2013) compared partial least square regression (**PLSR**) and Fourier descriptors (FD). These 3 methods are efficient tools commonly used in shape processing (Vranic and Saupe, 2001; Allen et al., 2003; Zion et al., 2007). Bercovich et al. (2013) concluded that the best method was the model predicting BCS linearly from a few FD. The PCA learning method proposed by Azzaro et al. (2011) performed better on external validation than did methods using partial 2D information (Bewley et al., 2008; Halachmi et al., 2008) and PLSR or FD learning methods (Bercovich et al., 2013). The main reason according to Bercovich et al. (2013) was that they could only focus on the tailhead area, whereas the hooks are important too (Edmonson et al., 1989). These results reflect that it is

important to focus on the area going from the hook bones to the pin bones and to work with whole information previously compressed with factor extraction techniques (PCA, PLSR, and FD) rather than using partial indicators.

Dealing with 2D images implies a loss of information that is kept in the third dimension. More recent work assessing body condition with 3D surfaces showed a level of calibration similar to the best calibration observed with 2D methods (Weber et al., 2014).

To enhance the prediction quality of an assumed shape-correlated indicator, using 3D appeared more relevant than using 2D because 3D depicts the most complete information available to analyze the shape's variability. The idea in this project was to work with whole information available to depict a 3D surface to identify the traits of the variation in shapes, which are associated with body condition variability. Therefore, the present study aimed at working closely with imaging experts from 3DOuest (Lannion, France) to develop a method combining the use of 3D shapes of the rear and the reduction of the number of 3D variables using PCA to assess BCS with greater objectivity and higher precision. Moreover, because only a few studies analyzed their method validation, we assessed external validation, repeatability, and reproducibility of the method.

Material and Methods

Experimental System Overview

Data. Data were collected at the INRA-UMR PEGASE experimental dairy station in Méjusseume, France, between March and July 2013. Cows are milked twice a day and weighed individually and automatically at the milking parlor's exit on a weighing static station (DeLaval France, Elancourt, France).

Surface Acquisition System. The 3D acquisition system was an Xtion PRO Live Motion Sensor (ASUSTek Computer Inc., Taiwan). Ninety pictures are captured in 3 s and stacked to build a 3D surface. The sensor was attached 2 m up from the soil level at weigh station entry and connected to a mechanical sensor detecting the opening and closing of entry doors. The door opening reset the camera to its initial position, and the door closing automatically started the scan. The reference area was located between the top of the hook bones and the pin bones. Indeed, most of the BCS charts focus their scoring on 2 areas: the flank and the area between the hook bones and pin bones. Edmonson et al. (1989) observed that overall BCS was reliably correlated with hooks and pins prominence, with the depression between the hook bones and with the depression between the hook bones and the pin bones. The 3D surfaces were automatically saved to a computer with date and hour of scan.

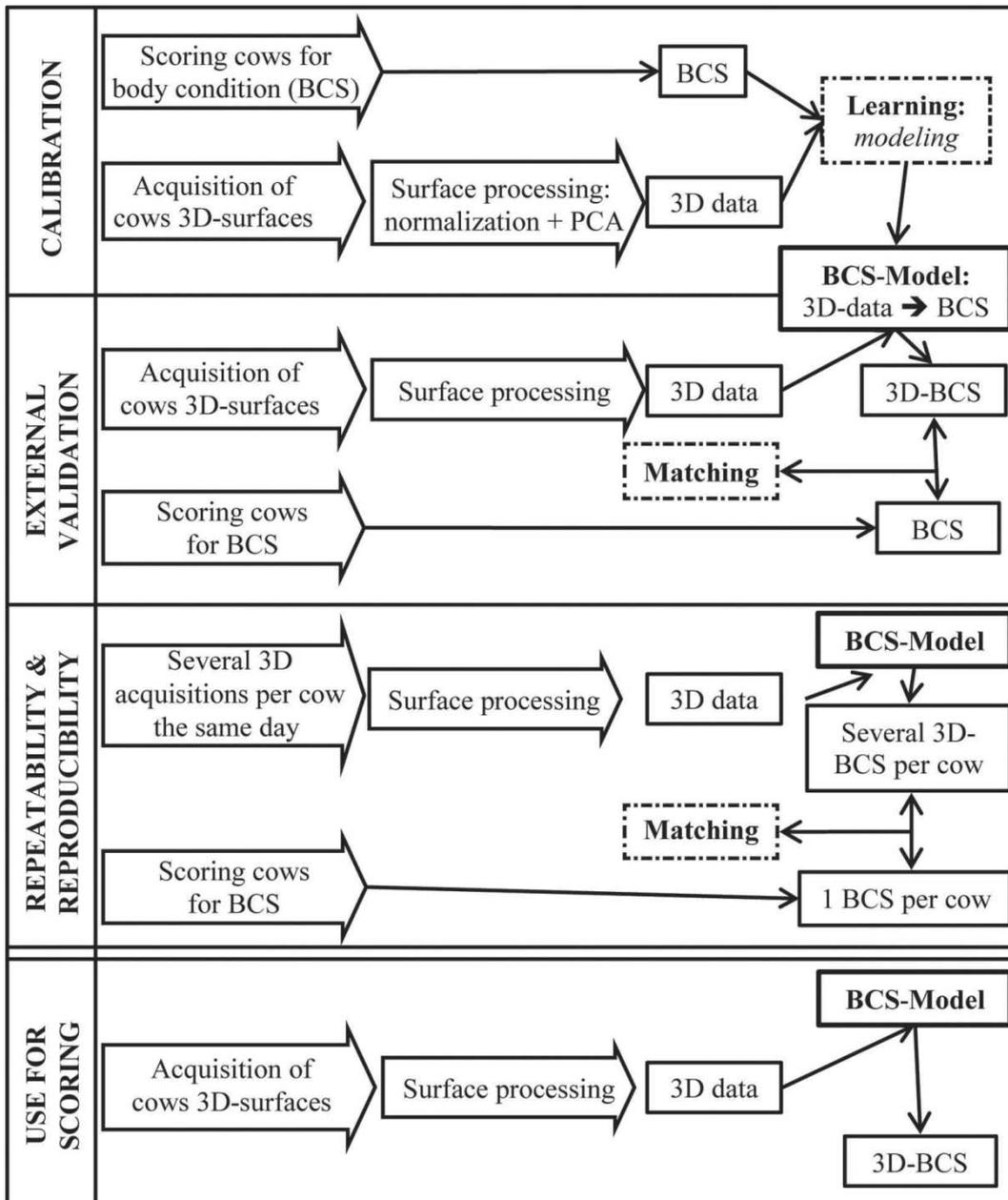


Figure 1 Methodology to estimate BCS with 3-dimensional surfaces: calibration, external validation, repeatability, and reproducibility and use for scoring.

Manual Body Condition Scoring. Cows were scored for body condition once per month, on the same day as 3D scans, by 3 technicians using the French BCS chart defined by Bazin et al. (1984). This system involves palpation of the tail head and of the last rib. Scores were scaled every 0.25 points, ranging from 0 for a thin cow to 5 for a fat cow. Each technician assigned one BCS resulting from the mean of the BCS per area, and the mean of the BCS assigned by the 3 technicians was taken as the final BCS.

Methodology: From 3D Surface to BCS Estimation

The method involves 2 main steps: first, the surfaces are normalized using several transformations to render them comparable, followed by a calibration step that adjusts and selects the best equation to assess BCS from the 3D information set previously summarized by PCA (Figure 1).

3D Surface Normalization: Defining Shared Information to Be Analyzed. Because position in the weigh station varies for each cow, the scanned anatomical area varied between acquisitions. The first step consisted of extracting common 3D information to ensure that the information being analyzed referred exactly to the same anatomical area for each 3D surface and to the same number of 3D points per 3D surface, independent of the size of the cow. The idea was to align the surfaces and then to superimpose them to find the surface common to the set of 3D surfaces used for the calibration (Figure 2). To assess BCS independently of the anatomical size of the cow, the 3D surfaces were standardized on a common rear size.

The 3D surfaces were aligned to compensate for location differences in the weigh station. To align the 3D surfaces, the coordinate space, which is originally centered on the camera, was transformed in a space centered on the cow's rear, called rear-centered space. Therefore, 4 anatomical landmarks were manually identified: top of the left hook bone (**HBL**) and top of the right hook bone (**HBR**), as well as with 2 points at the base of the sacrum, one on the left side (**SBL**) and one on the right side (**SBR**). These 4 landmarks were used to define the X- and Y-axes of the rear-centered space, and the Z-axis was defined as orthogonal to the X- and Y-axes (Figure 3). The 3D surfaces were then aligned by superimposing the rear-centered space defined for each 3D surface. The 3D surfaces were standardized on a common rear size to delete any variability in 3D surfaces that could be related to size and not to body condition. The mean of the coordinates was estimated for each landmark in the calibration set. The 3D surfaces used for the calibration were resized such that the 4 landmarks had these calculated means as coordinates (Figure 3).

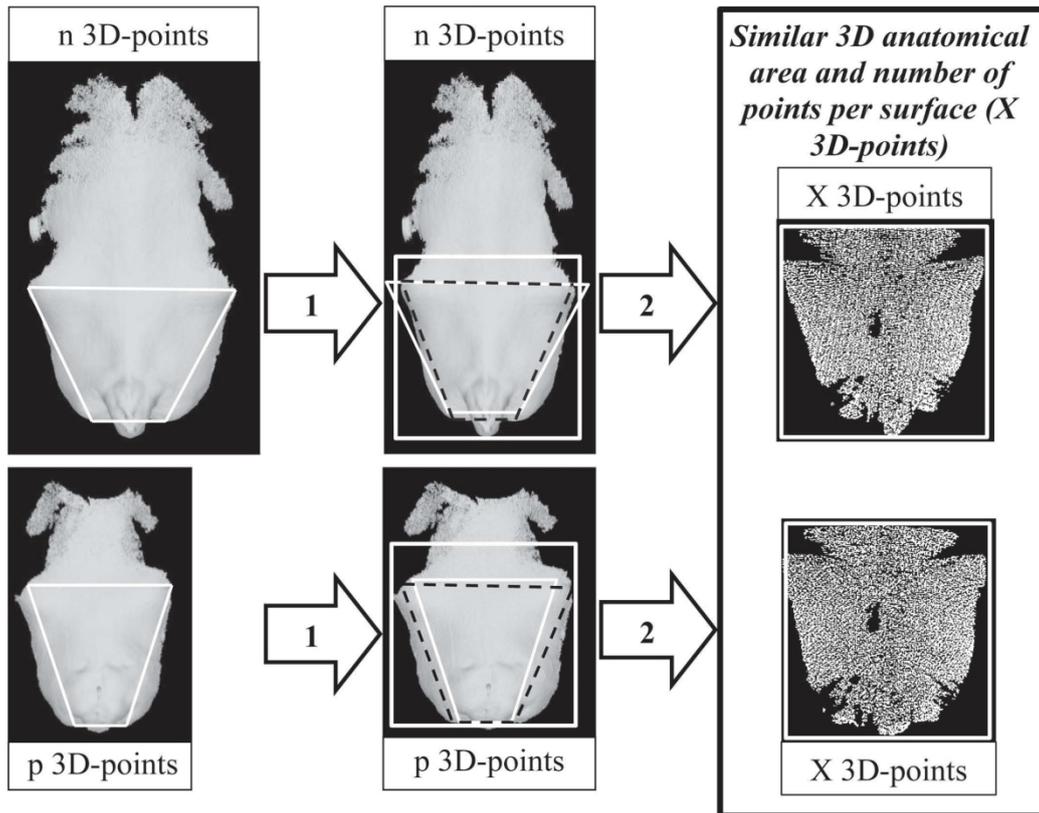


Figure 2 Three-dimensional (3D) surface processing to extract the 3D information common to the set of 3D surfaces used for the calibration: example of 2 3D surfaces, one initially composed of n 3D points and one with p 3D-points ($n > p$). The first step (1) rescales the individual format of each 3D surface (white trapezoid) on a common rear format (dashed black trapezoid), and second step (2) superimposes the 3D surfaces used for the calibration to find the set of 3D points common to the 3D surfaces used for the calibration (white rectangle with X common 3D points; $n > p > X$).

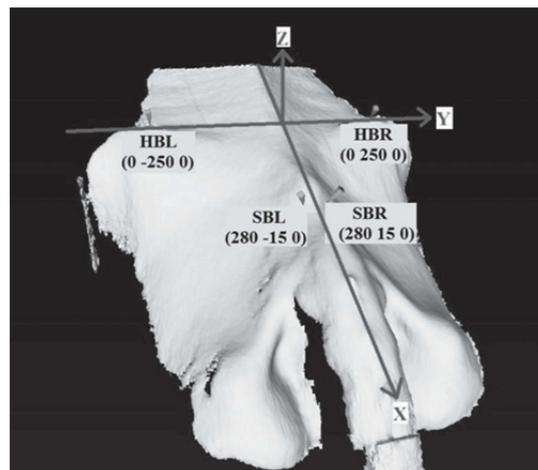


Figure 3 Localization of the 4 anatomical landmarks hook bone left (HBL), hook bone right (HBR), sacrum basis left (SBL), and sacrum basis right (SBR) used to normalize the 3-dimensional surfaces and their coordinates after size standardization.

From this point on, 3D surfaces were standardized on a common rear size, though they did not necessarily have the same number of 3D points. To analyze comparable information between 3D surfaces, the aim was to extract the set of 3D points shared by the set of 3D surfaces used for the calibration. These 3D surfaces were orthogonally projected onto the X-Y plane of the rear-centered space. The intersection of these projections defines the area shared by the whole calibration set. This intersection, called the mask, was then split into a 150×150 grid (i.e., 22,500 pixels). Each 3D surface was orthogonally projected onto this mask. Because a 3D surface contains more than 22,500 points, each pixel refers to several 3D point projections. To ensure having exactly the same number of points per pixel, only one 3D point per pixel was kept: the one with the highest Z coordinate, and the others were removed from the pixel.

Calibration Step: Assessing BCS from 3D Information. After normalization, the next step consisted in summarizing the variability of 3D surfaces by performing PCA. The calibration set was defined with 3D surfaces characterized at the most with 22,500 pixels described with 3 coordinates each; pixels without any 3D-points were not kept in the data. Each 3D surface was the result of a combination of 67,500 descriptors. A PCA was performed to define a space characterizing as much variability of the data set as possible with the least number of dimensions. In this way, 3D surfaces used for calibration were used in a PCA as the statistical individuals and their 67,500 3D references as the variables. Each 3D surface was projected onto this PCA space and became a linear combination of its coordinates in this PCA space.

The last step of the calibration process consisted of predicting BCS using the summarized information of the 3D shape by PCA. The calibration aimed at mathematically defining the link between the manually scored BCS and the coordinates of the 3D surface in the PCA space. The coordinates on the eigenvectors were regressed on BCS with a multiple linear regression with the `lm` function of R (R Core Team, 2013). This model is defined as follows:

$$BCS_i = \alpha + \beta_1 \times eig_{i1} + \beta_2 \times eig_{i2} + \dots + \beta_k \times eig_{ik} + \dots + \beta_n \times eig_{in} + \epsilon_i \quad [1]$$

where BCS_i is the BCS estimated by technicians of the i th cow; eig_{ik} is the coordinate of the 3D surface associated with cow i on the k th principal component of the PCA; n is the maximum number of principal components allowed in the model according to degrees of freedom; α , β_1 , β_2, \dots, β_n are the regression parameters, and ϵ_i is the residual error. The best model was selected by stepwise regression thanks to the step function in R. The stepwise regression initiates with the null model and adds at each step the more explanatory variable at 5% significance and deletes the variable that was previously added if this variable is not as explanatory as the freshly added variable. The best model is the one with the least variables and the smallest Akaike information criterion. To look over model robustness, the quality of

the model selected by stepwise and those built at each step of the stepwise were compared according to their adjusted coefficient of determination (R^2) and the error of prediction when performed on external data sets. To assess the BCS of a 3D surface out of calibration set, the normalized surface was projected onto the mask, then onto the PCA space, and its coordinates on the PCA space were replaced in the model.

Procedure to Validate the Method

To develop a method for a high-throughput use, it is important to characterize the properties of this new technology in terms of validation and repeatability. Figure 1 describes the steps used to validate the method.

External Validation Procedure. Validation qualifies the capacity of the selected model to accurately estimate the predicted variable (here, BCS scored by 3 technicians) when testing the model on individuals not used for calibration. Estimated BCS is called **3D BCS**. The mean standard error of prediction (**MSEP**) was used to qualify validation and was defined according to Wallach (2006) as the sum of the following 3 errors to better understand MSEP variability: the biased squared error, defined as the squared difference between average measured BCS and average estimated BCS; the slope error, depending on how closely correlated the slope of the regression of BCS on 3D BCS was to 1; and the unexplained error, depending on how variations in BCS and 3D BCS were correlated. Validation reliability was tested on 2 sets of cows: on the one hand on 3D surfaces from cows selected for calibration, but with different stage in lactation (**validationset_stage** data set), and on the other hand on 3D surfaces from cows not used for calibration (**validationset_cows** data set).

Repeatability and Reproducibility. Repeatability assesses the error generated when estimating an indicator several times on the same sample with the same methodology in the same environment in a short period of time. Reproducibility assesses the same error but under variable environmental conditions. In this way, repeatability was estimated by extracting the 4 landmarks 8 times on the same day, from the same 3D scan, and reproducibility was estimated with cows scanned 8 times each on the same day, with the 4 landmarks extracted once per 3D surface. The 3D BCS variation was corrected for the effect of the chosen cows in extracting the residuals of the model of ANOVA, which explains 3D BCS with the cow's identity factor. Coefficients of variation for repeatability (CV_r) and for reproducibility (CV_R) were assessed:

$$CV_r = \frac{\sigma_r}{M_r} \times 100, \quad CV_R = \frac{\sigma_R}{M_R} \times 100 \quad [2]$$

where σ_r and σ_R are SD of the corrected 3D BCS, respectively, for the repeatability and reproducibility data sets; and M_r and M_R are, respectively, the mean 3D BCS in the repeatability and reproducibility data sets. In the same way the repeatability and reproducibility of BCS were estimated by correcting BCS variability from the effect of the chosen cows and from the effect of the experts dealing with body condition scoring: 1 model is an ANOVA including “cow’s identity” as a factor and 1 ANOVA model includes cow’s identity and BCS expert’s identity as factors to explain BCS for repeatability and reproducibility, respectively. The more repeatable (reproducible) the 3D BCS is, the smaller the CV_r (CV_R).

Data Sets Used. Once per month from March to July 2013, all lactating cows were scanned on the same day as body condition scoring at evening milking. Dry cows with extremely high BCS were scanned twice within 3 mo and added to the sample to build a calibration data set representing a wide range of animal factors including BCS, BW, parity, and DIM. All data sets were built from this perspective: 57 3D surfaces associated with 56 cows (1 cow used twice at a different stage in lactation) built a calibration data set with BCS ranging from 0.5 to 4.8 and a mean of 2.2, and included all BCS extreme cows. Validation data sets included 25 3D surfaces each, with BCS between 0.8 and 4.8 and a mean of 2.3 for validationset_stage, and between 0.8 and 2.9 with a mean BCS of 1.8 for validationset_cows. Method repeatability and reproducibility were analyzed with 6 cows associated with 6 BCS between 1.1 and 4.8 (Figure 4).

Results

A Functional Acquisition System Without Major Problems

The same prototype was used throughout the whole data collection period and gathered 1,433 scans from March to July 2013. One acquisition and its recording lasted 4 s. Despite the high performance of the 3D acquisition system, an average of 20% of 3D surfaces per acquisition series were rejected due to large holes and intermittent areas probably associated with cow movement while scanning.

The final data set used to develop the method contained 180 manually selected 3D surfaces and involved 81 cows: 56 cows used for the calibration and 25 used at a different lactation stage for the validationset_stage data set, and 25 other cows used for the validationset_cows

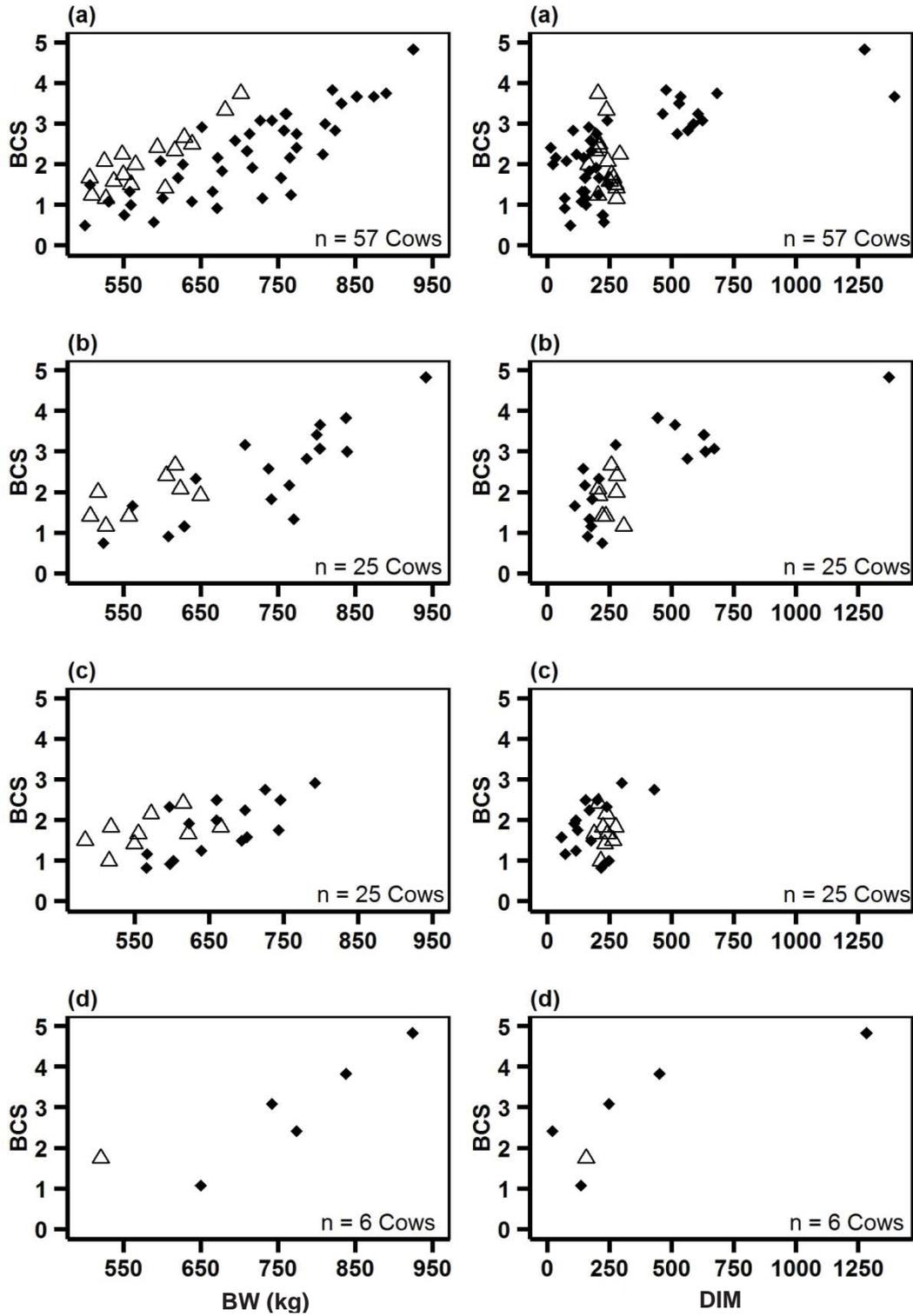


Figure 4 Description of data sets used for (a) the calibration, (b) the validation for validationset_stage and (c) the validation for validationset_cows and (d) the repeatability-reproducibility according to their BCS, BW, and DIM for primiparous (Δ) and multiparous cows (\blacklozenge).

data set; 6 of these 81 cows were used to estimate repeatability and reproducibility.

The Most Complete Model Provides a Perfect Calibration

The 57 3D surfaces defining the calibration data set were used in a PCA to compute the eigenvectors describing those surfaces. Their coordinates on the eigenvectors were regressed linearly on their corresponding BCS. The PCA resulted in 57 eigenvectors that were a combination of the set of 3D points referenced in each 3D surface before PCA computing.

The best multiple linear regression model selected by stepwise assessed BCS with 55 coordinates, associated with 55 eigenvectors. This model was able to explain almost 100% of BCS variability ($R^2 = 1$) in the calibration set, with an error close to 0.

Considering that the model had 56 degrees of freedom, a maximum of 55 variables could have been selected. Therefore the most complete model was also the best model selected by stepwise. The selection discarded the coordinates associated with the 57th and the 38th eigenvectors. Each principal component is described by its inertia, which is the percentage of the variability of the 3D surfaces it explains. The PCA orders eigenvectors according to inertia, considering that the first is the eigenvector with the highest inertia. Eigenvector ranking differed from their order of appearance in the selected linear model. However, the first 2 eigenvectors in PCA were also the first 2 eigenvectors selected by stepwise. They explained 68.5% of 3D surface variability and the model including these 2 eigenvectors explained 71% of the variability of the BCS. In the end the 13 first eigenvectors were useful to describe 95% of 3D surface variability, whereas 19 had to be implemented in the model by stepwise to describe 95% of BCS variability.

External Validation Shows Similar Results for Both Validation Sets

The BCS was estimated on 2 data sets: validationset_stage, which contained cows previously used for calibration, but at different stages in lactation and validationset_cows, which contained new cows. Predicted BCS were strongly correlated with manually scored BCS when using the model on both validation sets ($r = 0.89$ for validationset_cows and 0.96 for validationset_stage, $P\text{-value} < 10^{-16}$, Figure 5). The MSE_P for both data sets were 0.09 and 0.10 point of BCS for validationset_stage and validationset_cows, respectively. The MSE_P was mostly unexplained with a higher rate being unexplained for validationset_stage compared with validationset_cows: 95.4 and 70.3% of MSE_P variability were unexplained, respectively; the remaining 29% were explained by slope error.

Running the set of models, selected at each step throughout the stepwise, on validation sets highlighted that prediction error decreased as stepwise continued. The MSEP was minimal at the 39th and 32nd step for validationset_stage and validationset_cows, respectively. The model selected by stepwise is not the one with the highest validation quality.

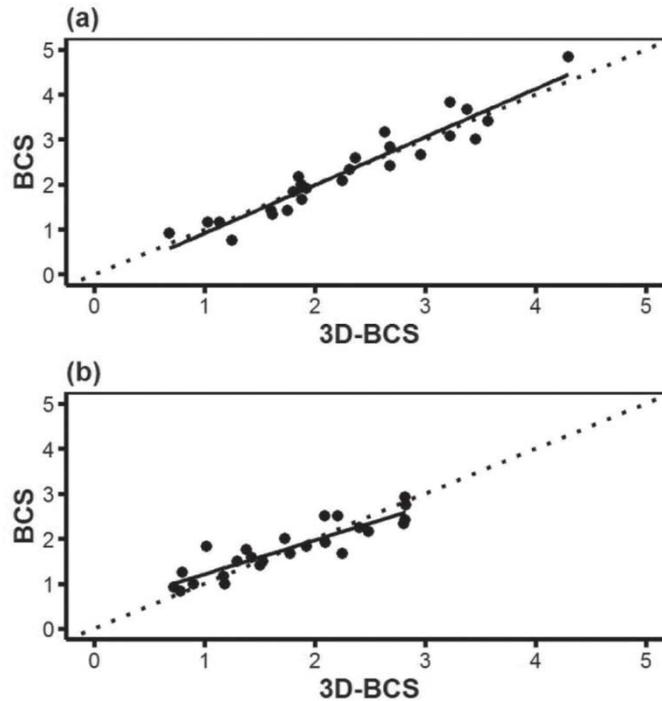


Figure 5 Validation of 3D BCS for both data sets (a) validationset_stage and (b) validationset_cows regarding manual BCS. The line of best fit is the solid line and the line of perfect concordance (slope of 1 and intercept of 0) is the dashed line.

A Repeatable and Reproducible Method

The particularity of this step was to assess error associated with the method independently of error associated with the reference method, in this case BCS. Processing each 3D surface 8 times meant that the 8 processes had the same BCS but that landmarking was repeated 8 times. Similarly, scanning each cow 8 times the same day meant that the error associated with BCS was the same for each scan, but the error associated with acquisition and processing differed for each scan. In this way, reproducibility error included repeatability error in its variability. The σ was equal to 0.075 (CVR = 2.91%) and σ_R was equal to 0.103 (CVR = 3.95%) BCS point. The method's acquisition system and surface processing are associated with an error characterizing 4% of the variation of assessed BCS. Ultimately, BCS assessed with 3D surfaces was 2.8 times more repeatable and reproducible than manually scored BCS (Table 1).

The step-by-step evolution of σ_r during stepwise selection was curvilinear with a minimum at the 28th step with σ_r of 0.068.

Table 1 Repeatability and reproducibility of the measures of body condition scored by experts and of BCS assessed by 3-dimensional (3D) method¹.

Method	σ_r	σ_R	CV_r	CV_R
3D BCS ²	0.075	0.103	2.91	3.95
BCS	0.210	0.280	10.05	13.44

¹ σ_r : standard deviation of repeatability; σ_R : standard deviation of reproducibility; CV_r : coefficient of variation of repeatability; CV_R : coefficient of variation of reproducibility.

²3D BCS: body condition score assessed with the 3D method.

Discussion

Several studies have investigated development of new methods to automatically assess the BCS of dairy cows with greater accuracy using 2D (Bewley et al., 2008; Halachmi et al., 2008, 2013; Negretti et al., 2008; Azzaro et al., 2011; Bercovich et al., 2013) or 3D information (Weber et al., 2014) relating to the surface of the cow's rear. The method proposes a new development in the use of pictures to assess BCS learning 3D-information with PCA.

An Efficient Acquisition System

Even though one more dimension was sampled, the developed acquisition system was as efficient as previous systems developed to collect 2D surfaces: the 3D camera was neither light sensitive, contrary to the camera used by Bewley et al. (2008), nor sensitive to changes in ambient humidity, contrary to the camera used by Azzaro et al. (2011). Consequently, fewer images had to be removed: 80% of the 3D surfaces were of good quality, whereas for Bewley et al. (2008) and Azzaro et al. (2011) only 23 and 2.75% of the entire pictures set were of sufficient quality, respectively.

Landmark Extraction Automation: An Imperative Step Before Monitoring

Identification of anatomical landmarks is essential in image processing because it defines a shape-centered space, which is the basis for subsequent analysis. This step was performed manually to assess the proof of concept and, therefore, was the most time-consuming step with on average 3 min spent per 3D surface. In comparison, Bewley et al. (2008) and Azzaro

et al. (2011) identified 23 anatomical points to describe the shape. Dividing the number of extracted landmarks by 8 significantly reduces the time consumed during image processing, but also facilitates the potential automation of the landmark extraction procedure. Nevertheless, extracting the 4 landmarks manually is too time and labor consuming to cope with high-throughput use on farm. Moreover, the results showed that method reproducibility was limited by method repeatability. In fact method repeatability is defined by the repeatability of landmark extraction. The subjectivity of manual extraction limits the repeatability of the method. To improve 3D BCS repeatability and consequently 3D BCS reproducibility, a solution would be to automate landmark extraction. Moreover, the high frequency of measurements enabled by automation will statistically increase the precision of 3D BCS estimates.

A Promising Methodology: 3D Rear Information Reflects BCS Variability Well

The model developed to assess BCS adjusted perfectly on observed BCS. With an R^2 equal to 1 and a SD equal to 0, the model explained the whole BCS variability in calibration set. The selected model contained 55 variables, which is the maximum the model can contain in light of the degrees of freedom. The equation containing 55 variables showed the best results for the calibration set, but the changes to the SD of the model when predicting BCS on validation sets during the stepwise was minimal around the 32nd step. We assume that the selected model probably includes coordinates associated with eigenvectors, which may explain specific shapes in the calibration set, without any generic meaning. This over-parameterization of the model could explain that external validation shows a smaller error when using a model with fewer variables. An influence analysis of the 3D surfaces on the parameters would analyze the relevance of each parameter in the model and a ridge regression would analyze the robustness of the model.

Good Validation and Reproducibility Limited by BCS Reproducibility

The correlation between 3D predicted BCS and observed BCS ($r = 0.89-0.96$) was similar to that observed by Halachmi et al. (2013; $r = 0.94$), who worked with 2D images of the cow's rear. Nevertheless, this comparison is not scientifically valid because experimental designs (BCS chart, BCS scorers) differed between both studies; the different methods should be used under the same conditions.

Both validation sets, `validationset_stage` and `validationset_cows`, displayed similar errors. Consequently, we assume that the model is no more sensitive to surfaces associated with cows used at a different lactation stage in the calibration set than surfaces never used before in method development. Azzaro et al. (2011) developed a method based on polynomial kernel PCA to learn 2D shapes and used linear regression of the eigenvalues to assess BCS. These researchers used the methods of Halachmi et al. (2008) and Bewley et al. (2008) and compared the validation of the 3 methods. Models developed by Bewley et al. (2008) and Azzaro et al. (2011) demonstrated the best validation (SD = 0.33 and 0.31 unit of BCS, respectively). Bercovich et al. (2013) used Fourier descriptors combined with a linear regression to assess BCS from the 2D rear contour. Their model validation was estimated with the RMSEP calculation and was worse than the current model: RMSEP = 0.34 and 0.31–0.32 units of BCS, respectively. To correctly compare the validation of these various methods, we should test them in the same experimental conditions and calculate the same indicators. Nevertheless, we may highlight here that validation errors are similar to the reproducibility error of the reference method, which was 0.28 BCS units in our study. The error generated when assessing BCS with 3D surfaces naturally includes the error of the reference method, here BCS. Calibrating 3D surfaces on a more precise and repeatable measure such as ultrasonography (Schröder and Staufenbiel, 2006) should reduce the body energy reserve measurement error. Weber et al. (2014) calibrated a set of distances, depths, and volumes extracted from 3D surfaces of the rear of dairy cows to assess backfat thickness measured by ultrasonography. Their method calibrated well with backfat thickness ($r = 0.96$), but neither validation nor repeatability was evaluated.

The method developed was 2.8 times more repeat able and reproducible than manually scored BCS. When assessing BCS with 3D surfaces, the measurement includes an error of 0.1 BCS units, independent of the error due to the reference method used. The majority of reproducibility error seemed to overlap with repeatability error. Repeatability error translates the error associated with manual landmark extraction. In this way, the next step would be to automate landmark extraction to completely eliminate human subjectivity.

In conclusion, the model performed well for calibration and validation. Nevertheless, one essential step is the automation of landmark extraction, which is underway: similar to Bercovich et al. (2013), an algorithm extracts automatically the 4 landmarks in identifying the local extreme points. After automation validation, the next step will be to validate the model on more dairy herds before using the method on a large scale. In practice, other experimental

farms and later commercial farms will be equipped with the prototype to collect more 3D surfaces and validate the model on those surfaces.

Nonbiased Learning of Global 3D Information with PCA: An Evolving Approach of Imaging

Principal component analysis is more flexible than using predetermined criteria thanks to its learning capacity. In fact, restricting trait analysis to a small number of specific criteria is risky as a first approach because these criteria are not necessarily the best ones for predicting this trait. The space defined by PCA allows as much variability kept in 3D surfaces as possible to be expressed, with the least number of dimensions. In this way, PCA-based learning on the global information contained in a shape should minimize such a bias.

Azzaro et al. (2011) and Bercovich et al. (2013) used factor extraction tools too: PCA, PLSR, and FD, respectively. Their average error rate on external validation was 0.31 unit of BCS for Azzaro et al. (2011) and 0.34 unit of BCS for Bercovich et al. (2013). The model developed in the current work performed as good as the model developed by Azzaro et al. (2011). The rear size of the 3D shapes has been standardized on a common size to ensure having variables with exactly the same definition on each 3D surface and to avoid problems due to body size variability as Bercovich et al. (2013) observed with PLSR method.

In terms of reproducibility, Bercovich et al. (2013) had an average error of 0.11 unit of BCS with the FD method, similar to our model error of 0.10 unit of BCS. Nevertheless, the BCS range they used to assess reproducibility was smaller than ours: from 2.2 to 3.6 (1 to 5 scale), from 1.1 to 4.8 (0 to 5 scale), respectively. It is important to characterize the method on the whole scale, even for the extremes. This comparison of studies shows that methods based on global shape analysis summarized by a statistical tool (PCA, PLSR, or FD) are the most efficient, whatever the statistical tool.

Moreover, as our approach focuses on the whole information contained in the shape and not on a local characteristic, this method could be easily adapted to other breeds or to other body condition charts, even if the more meaningful criteria differ. Method adaptation needs first to define a calibration set reflecting BCS variability as closely as possible, then to define the PCA space with this new calibration set, and finally to assess the coefficients of the model predicting BCS from the coordinates of the eigenvectors. Such a method is not only adaptable to several body condition charts, but also, thanks to its impartiality, should calibrate well on

other traits if the anatomical region is meaningful. All these evolutions can be carried out very rapidly, without any change in the software.

Conclusions

The cow's rear was described in 3D in the PCA space defined by the calibration data set. The PCA space was seen as the space expressing as much variability as available in 3D surfaces. The goal was to develop an automated system able to assess the BCS of dairy cows with more objectivity and lower costs than manually scored BCS and to use it on a large scale. Validation analysis showed good performance and consolidated the developed approach. For the moment, only 4 anatomical landmarks are manually extracted. Automation is underway and is essential to enable the method to be used on a large scale. A further improvement would be to calibrate the method on a more precise and objective method, such as ultrasonography, to reduce the error associated with the reference method. The efficacy of this methodology confirms that the use of 3D surfaces is a promising tool for phenotyping body condition, and shows that it will be possible to use 3D surfaces to assess several phenotypes, such as BW, which for the moment are not easy to measure accurately on a low budget.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the staff of the Méjusseume experimental farm, and more particularly thanks are due to J. Lassalas, M. Fargetton, G. Théaud, A. Cozien, M. Guilloux, P. Pichot, and J. Eslan for their involvement and efforts in collecting and transmitting BCS, BW, and herd information. Thanks are also due to the Join Technical Unit of Research and Ingeneering on dairy farming (UMT RIEL, Rennes, France) for the constructive and instructive exchanges. The authors thank the French national institute for agricultural research (INRA), Division of Animal Physiology and Livestock Systems (PHASE Nouzilly, France) division for its financing.

References

Allen, B., B. Curless, and Z. Popovic. 2003. The space of human body shapes: Reconstruction and parameterization from range scans. *ACM Trans. Graph.* 22:587–594.

- Azzaro, G., M. Caccamo, J. D. Ferguson, S. Battiato, G. M. Farinella, G. C. Guarnera, G. Puglisi, R. Petriglieri, and G. Licitra. 2011. Objective estimation of body condition score by modeling cow body shape from digital images. *J. Dairy Sci.* 94:2126–2137. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2010-3467>.
- Bazin, S., P. Augéard, M. Carreau, H. Champion, Y. Chilliard, G. Cuyille, C. Disenhaus, G. Durand, R. Espinasse, A. Gascoin, M. Godineau, D. Jouanne, O. Ollivier, and B. Remond. 1984. Grille de notation de l'état d'engraissement des vaches pie-noires. Institut Technique de l'Élevage Bovin, Paris, France.
- Bercovich, A., Y. Edan, V. Alchanatis, U. Moallem, Y. Parmet, H. Honig, E. Maltz, A. Antler, and I. Halachmi. 2013. Development of an automatic cow body condition scoring using body shape signature and Fourier descriptors. *J. Dairy Sci.* 96:8047–8059. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-6568>.
- Berry, D. P., F. Buckley, P. Dillon, R. D. Evans, M. Rath, and R. F. Veerkamp. 2003. Genetic relationships among body condition score, body weight, milk yield, and fertility in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 86:2193–2204.
- Bewley, J. M., A. M. Peacock, O. Lewis, R. E. Boyce, D. J. Roberts, M. P. Coffey, S. J. Kenyon, and M. M. Schutz. 2008. Potential for estimation of body condition scores in dairy cattle from digital images. *J. Dairy Sci.* 91:3439–3453. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2007-0836>.
- Coffey, M. P., G. Simm, W. G. Hill, and S. Brotherstone. 2003. Selection for energy balance in dairy cows. *Interbull Bull.* 31:107. Accessed Apr. 23, 2015. <https://journal.interbull.org/index.php/ib/article/download/808/799>.
- Dechow, C. D., G. W. Rogers, and J. S. Clay. 2002. Heritability and correlations among body condition score loss, body condition score, production and reproductive performance. *J. Dairy Sci.* 85:3062–3070.
- Edmonson, A. J., I. J. Lean, L. D. Weaver, T. Farver, and G. Webster. 1989. A body condition scoring chart for Holstein dairy cows. *J. Dairy Sci.* 72:68–78.
- Ferguson, J. D., G. Azzaro, and G. Licitra. 2006. Body condition assessment using digital images. *J. Dairy Sci.* 89:3833–3841.
- Halachmi, I., M. Klopčič, P. Polak, D. J. Roberts, and J. M. Bewley. 2013. Automatic assessment of dairy cattle body condition score using thermal imaging. *Comput. Electron. Agric.* 99:35–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2013.08.012>.
- Halachmi, I., P. Polak, D. J. Roberts, and M. Klopčič. 2008. Cow body shape and automation of condition scoring. *J. Dairy Sci.* 91:4444–4451. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2007-0785>.
- Kristensen, E., L. Dueholm, D. Vink, J. E. Andersen, E. B. Jakobsen, S. Illum-Nielsen, F. A. Petersen, and C. Enevoldsen. 2006. Within- and across-person uniformity of body condition scoring in Danish Holstein cattle. *J. Dairy Sci.* 89:3721–3728.
- Negretti, P., G. Bianconi, S. Bartocci, S. Terramocchia, and M. Verna. 2008. Determination of live weight and body condition score in lactating Mediterranean buffalo by visual image analysis. *Livest. Sci.* 113:1–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2007.05.018>.
- Pryce, J. E., and B. L. Harris. 2006. Genetics of body condition score in New Zealand dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89:4424–4432.
- Pryce, J. E., W. J. Wales, Y. de Haas, R. F. Veerkamp, and B. J. Hayes. 2014. Genomic selection for feed efficiency in dairy cattle. *Animal* 8:1–10. <http://dx.doi.org/10.1017/s1751731113001687>.

- R Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Accessed Apr. 23, 2015. <http://www.R-project.org/>
- Roche, J. R., and D. P. Berry. 2006. Periparturient climatic, animal, and management factors influencing the incidence of milk fever in grazing systems. *J. Dairy Sci.* 89:2775–2783. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72354-2](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72354-2).
- Ruegg, P. L., and R. L. Milton. 1995. Body condition scores of Holstein cows on Prince Edward Island, Canada: Relationships with yield, reproductive performance, and disease. *J. Dairy Sci.* 78:552–564.
- Schröder, U. J., and R. Staufenbiel. 2006. Invited Review: Methods to determine body fat reserves in the dairy cow with special regard to ultrasonographic measurement of backfat thickness. *J. Dairy Sci.* 89:1–14.
- Szabo, C., L. Babinszky, M. W. A. Verstegen, O. Vangen, A. J. M. Jansman, and E. Kanis. 1999. The application of digital imaging techniques in the in vivo estimation of the body composition of pigs: A review. *Livest. Prod. Sci.* 60:1–11.
- Vranic, D. V., and D. Saupe. 2001. 3D Shape Descriptor Based on 3D Fourier Transform. Proceedings of ECMCS-2001, the 3rd EURASIP Conference on Digital Signal Processing for Multimedia Communications and Services, Budapest, Hungary. <http://nbnresolving.de/urn:nbn:de:bsz:352-231461>.
- Wallach, D. 2006. Evaluating crop models. Pages 17–25 in *Working with Dynamic Crop Models*. D. Wallach, D. Makowski, and J. W. Jones, ed. Elsevier, London, UK.
- Waltner, S. S., J. P. McNamara, J. K. Hillers, and D. L. Brown. 1994. Validation of indirect measures of body fat in lactating cows. *J. Dairy Sci.* 77:2570–2579.
- Weber, A., J. Salau, J. H. Haas, W. Junge, U. Bauer, J. Harms, O. Suhr, K. Schönrock, H. Rothfuß, S. Bielezki, and G. Thaller. 2014. Estimation of backfat thickness using extracted traits from an automatic 3D optical system in lactating Holstein-Friesian cows. *Livest. Sci.* 165:129–137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2014.03.022i>.
- Zion, B., V. Alchanatis, V. Ostrovsky, A. Barki, and I. Karplus. 2007. Real-time underwater sorting of edible fish species. *Comput. Electron. Agric.* 56:34–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2006.12.007>.

II. L'automatisation de l'extraction des quatre points caractéristiques³

Les résultats précédents ont permis d'établir la preuve du concept de l'estimation de la note d'état corporel (NEC) par imagerie 3D (NEC-3D). Pour une utilisation en routine et à haut débit, l'automatisation de l'extraction des 4 points caractéristiques est essentielle. L'objectif de ce paragraphe est de comparer la NEC-3D estimée avec l'extraction manuelle des points (**NEC-3Dmanu**) à la NEC-3D estimée avec l'extraction automatique des points (**NEC-3Dauto**). Pour faciliter l'extraction des 4 points, 4 autres points anatomiques ont dû être

³ Ce chapitre a été communiqué oralement au congrès Joint Annual Meeting à Orlando :

Fischer A, Luginbuhl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2015a. Analyzing the rear shape of dairy cows in 3D to better assess body condition score. In ADSA-ASAS Joint Annual Meeting, 12-17/07/2015, Orlando, USA, p. 814.

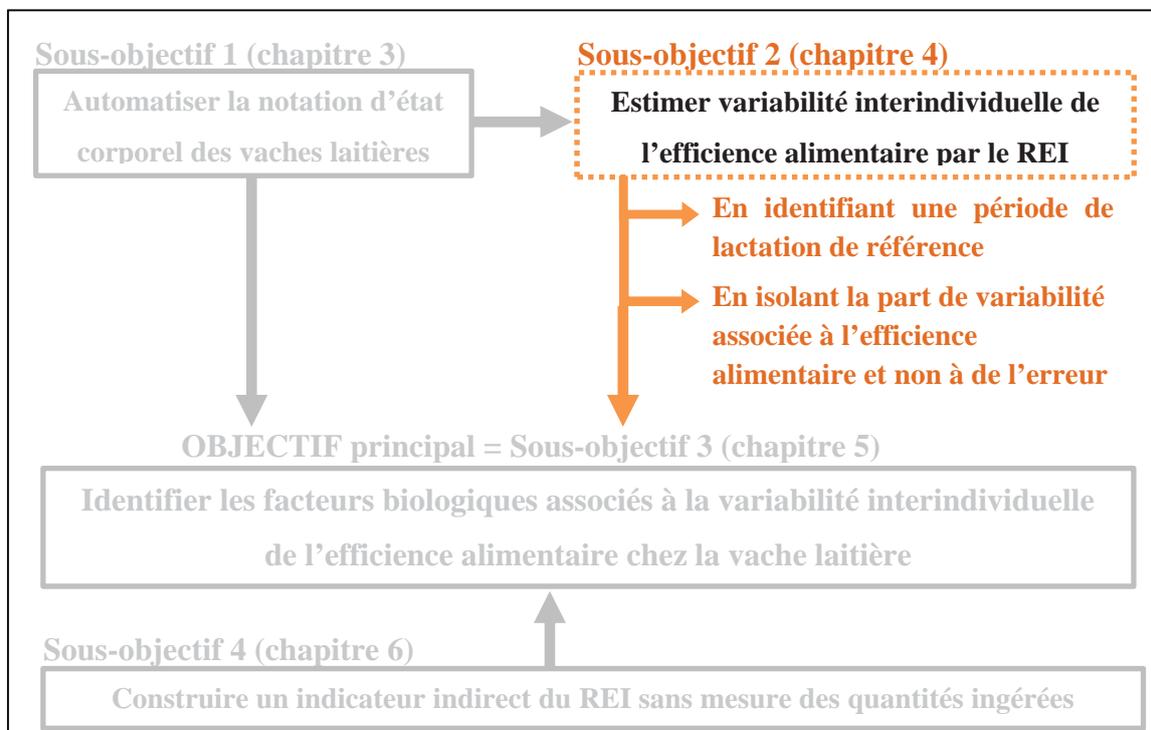
choisis : les deux pointes de hanche, tels que définies dans la preuve du concept, et les pointes de fesses. Pour valider cette méthode automatique, les mêmes populations de calibration, de validation externe pour les vaches hors calibration et de reproductibilité, que pour la preuve du concept, ont été utilisées.

Les performances de la méthode NEC-3Dmanu, appliquée avec les 4 nouveaux points choisis, sont légèrement inférieures aux performances de la méthode utilisant les 4 points de référence pour la preuve du concept : l'erreur de prédiction en validation externe est de 0,34, comparée à 0,32 pour les quatre points de la preuve du concept et l'erreur de reproductibilité est de 0,20, alors qu'elle était de 0,10 pour les quatre points de la preuve du concept. Ces résultats montrent que la précision de la méthode est liée à la localisation des quatre points anatomiques et est plus importante pour les quatre points utilisés dans la preuve du concept. Cependant, l'extraction automatique des quatre points de la preuve du concept n'a pas été réalisable.

La NEC-3Dauto a une meilleure validation externe (RMSE = 0,27) et une reproductibilité équivalente (erreur standard = 0,20) à la NEC-3D manu estimée avec les quatre nouveaux points. Ces résultats montrent que l'automatisation de l'extraction des quatre points anatomiques est faisable et donne une NEC-3D ayant des performances équivalentes à NEC-3Dmanu réalisée avec les quatre nouveaux points anatomiques. Cependant ces performances sont plus faibles que celles obtenues avec la NEC-3D de la preuve du concept, i.e. réalisée avec les quatre points de la preuve du concept. Cependant, les mesures à haut débit permises par l'automatisation de la méthode vont naturellement réduire l'erreur de mesure de la NEC. L'utilisation de la NEC-3Dauto à haut débit est prometteuse pour estimer plus finement les variations de NEC à court terme.

Chapitre 4

Estimation de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire



L'utilisation de méthodes de mesure à haut débit, telles que la méthode développée dans le chapitre précédent, réduit les erreurs de mesure et par conséquent la part du residual energy intake associée à des erreurs. Cependant même dans ces conditions, parce que le residual energy intake est un résidu de modèle statistique, il contient naturellement toutes les erreurs d'ajustement et toutes les erreurs de mesure du modèle. Comme les residual energy intake utilisés dans la bibliographie diffèrent non seulement en termes de méthode de mesure mais aussi en termes de modèle statistique utilisé, les residual energy intake obtenus sont difficilement comparables entre eux.

Ce chapitre a donc pour objectif de proposer une définition plus répétable du residual energy intake.

La première partie du chapitre vise à définir une période de la lactation aboutissant à une estimation stable et sans biais du residual energy intake. A cet effet, l'idée est de caractériser la répétabilité du residual energy intake au cours de la lactation en définissant des sous-périodes de lactation, et de les comparer au residual energy intake de référence, calculé à partir de variables moyennées sur la lactation.

La seconde partie du chapitre vise à isoler la part du residual energy intake associée à la variabilité de l'efficacité alimentaire et non à des erreurs de mesure ou d'ajustement du modèle. La méthode proposée utilise un modèle mixte avec un effet aléatoire individuel qui estime des coefficients de régression individuels. C'est par différence entre la part expliquée par les coefficients moyens de la population et la part expliquée par les coefficients individuels que cette méthode originale permettra d'isoler la part individuelle de l'énergie nette ingérée attendue par le modèle.

I. Identification d'une période de mesure robuste au cours de la lactation¹

Residual energy intake repeatability throughout the lactation in Holstein cows

Répétabilité de l'énergie nette ingérée résiduelle au cours de lactation des vaches Holstein

A. Fischer^{1,2} and P. Faverdin²

Résumé

Mesurer la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire est un challenge. Le residual energy intake, couramment utilisé comme indicateur de l'efficacité alimentaire, nécessite des mesures individuelles précises et fréquentes des quantités ingérées et des principaux postes de dépenses énergétiques de l'animal. Même si le residual energy intake a largement été adopté, sa définition reste très variable dans la bibliographie, plus particulièrement la définition de la période de mesure.

L'objectif de cette étude a donc été d'analyser la répétabilité du residual energy intake au cours de la lactation des vaches laitières de race Holstein. Les quantités ingérées et les principaux postes de dépenses énergétiques ont été mesurés fréquemment pour chacune des 119 vaches suivies sur les 238 premiers jours de lactation. Le residual energy intake (**REI**) a été défini comme le résidu d'une régression linéaire multiple de l'énergie nette ingérée moyennée sur la lactation en fonction de la perte et du gain de note d'état corporel cumulé sur la lactation et de la moyenne sur la lactation du poids vif métabolique et de l'énergie nette du lait. Pour étudier la répétabilité au cours de la lactation, le REI a été estimé par quinzaine de lactation en comparant deux approches : une régression linéaire multiple ajustée pour chacune des 17 quinzaines de lactation et un modèle mixte avec un effet répété des quinzaines.

Le modèle mixte montre que la lactation était structurée en trois périodes homogènes en REI: les quinzaines 1 à 4, 5 à 8 et 9 à 17. En effet, les corrélations des REI inter-quinzaines étaient élevées et homogènes intra-période, et faibles et plus variables inter-périodes. Les REI étaient négatifs, malgré la prise en compte des variations de réserves corporelles dans le modèle, et plus variables pour les quinzaines 1 à 5. Cette même période a aussi été identifiée avec l'autre modèle dont les coefficients de régression, de détermination et les écart-types résiduels ainsi que la corrélation entre REI estimé par quinzaine et REI estimé sur la lactation devenaient stables à partir de la quinzaine 5. Les coefficients de la régression ajustée sur les variables

¹ Cette première partie est présentée pour une future soumission au journal ANIMAL.

moyennées sur la lactation étaient proches des standards de la bibliographie alors que ceux obtenus pour les deux modèles ajustés sur les variables moyennées par quinzaine étaient différents des standards et variables au cours de la lactation. Cette plus grande variabilité dans l'estimation du REI en début de lactation reflète probablement la difficulté des méthodes utilisées à mesurer précisément des variations rapides et simultanées de plusieurs caractères : la mobilisation des réserves caractéristique du début de lactation et l'augmentation des quantités ingérées. L'ensemble de ces résultats suggère d'éviter de mesurer le REI sur un pas de temps court tel que la quinzaine et d'éviter les 5 premières quinzaines de lactation.

Residual energy intake repeatability throughout the lactation in Holstein cows

A. Fischer^{1,2} and P. Faverdin²

¹Department of animal husbandry techniques and environment, Institut de l'élevage, Monvoisin, 35650 Le Rheu, France

²UMR 1348 PEGASE, INRA, Agrocampus-Ouest, domaine de la Prise, 35590 Saint-Gilles, France

Corresponding author: Philippe Faverdin. E-mail: philippe.faverdin@inra.fr

Short title: Residual energy intake repeatability in dairy cows

Abstract

Measuring feed efficiency variability among animals is a challenge. Indeed the commonly used residual feed intake requires heavy and precise measures of individual feed intake and of the main energy expenditures. Even if residual feed intake has largely been adopted, its definition remains highly variable across literature, especially concerning the measurement period. The present study aimed therefore at analysing residual energy intake repeatability throughout the lactation in dairy Holstein cows. Both, daily feed intake and the traits associated with the main energy expenditures were monitored frequently for each of the 119 Holstein cows during the first 238 days in milk. Residual energy intake (**REI**) was estimated as the residuals of a multiple linear regression estimating lactation mean net energy intake from lactation averages for net energy for lactation, metabolic BW and lactation body condition score loss and gain. To study REI repeatability throughout the lactation, REI was estimated per 14-day periods, referred to as fortnight, through two complementary approaches: a multiple linear regression fitted within each fortnight and a mixed model with a repeated time structure. The mixed model approach highlighted that the lactation was structured in three sub-periods which had homogenous REI: fortnights 1 to 4, 5 to 8 and 9 to 17. Indeed REI correlations between fortnights were high and homogenous within but weak and more variable between these periods. REI were found negative and more variable between fortnights 1 to 5 in spite of considering changes in body reserves. The same period was identified with the linear regression approach for which both, the correlation between fortnight REI and lactation REI and the regression coefficients, coefficient of determination and residual standard deviation, became stable from fortnight 5 on. Moreover lactation average regression had coefficients close to standard literature coefficients whereas fortnight

regression models differed and were variable throughout lactation. The higher variability in REI estimation at lactation start probably reflects the difficulty of the used methods to accurately measure rash and simultaneous changes of several traits, characteristic of lactation start in dairy cows.

Key words: feed efficiency, time structure, dynamic, milk, cattle

Implications

Residual energy intake is often used in research to measure feed efficiency. One issue is to identify the appropriate and most informative lactation period to have a good estimate of lactation feed efficiency without monitoring during whole lactation. The study showed that residual energy intake should be measured for a mid or long-term period during second half of lactation and not during the first 5 lactation fortnights. Existing phenotypes are not accurate and direct enough to measure rashly energy expenditure change occurring especially at lactation start.

Introduction

Improving feed efficiency is considered as one possible solution to improve animal production sustainability: using fewer resources of land and non-human edible protein to produce equally or more animal proteins. Measuring feed efficiency variability among animals is a challenge, especially because feed efficiency requires heavy and precise measures of individual feed intake and of the main energy expenditures. In research field, feed efficiency is usually assessed with residual feed intake (**RFI**), firstly defined by Koch *et al.* (1963) in beef cattle and largely adopted in other species. RFI is defined as the residuals of the model assessing feed or energy intake from main expenditure traits, such as average daily gain, metabolic BW for maintenance in growing animals or lactation production, metabolic BW, BW change in lactating animals (Berry and Crowley, 2013). As a difference between measured feed intake and expected feed intake, a positive RFI means that animal ate more than expected, he is less efficient than expected and conversely when RFI is negative a cow is more efficient than expected. By definition RFI is independent of expenditure traits included in the model which is interesting for selection purpose on feed efficiency.

The challenge of measuring feed efficiency is far higher for reproductive females, especially because they encounter different physiological periods which do not imply the same functions and thus maybe not the same efficiency. In dairy cows this issue is much more important

because their career is long and driven by a permanent and changing interaction between growing at life start and then maintenance, lactation and gestation, such as suggested by the model developed by Martin and Sauvant (2010). The resource allocation and acquisition modelling proposed by Puillet *et al.* (2016) in dairy cows not only suggested that feed efficiency depends on life stage at which it is estimated but also that feed efficiency depends on the interaction level between the main functions. The major difficulty is to know whether this lack of repeatability is biologically founded or is due to a lack of repeatability of the indicator used to estimate feed efficiency. This question is all the more alarming that part of RFI is by definition associated with measurement and model fitting errors and that RFI variation is highly and negatively dependent on model traits measurements accuracy and frequency (Robinson, 2005).

Focussing on dairy cows, the lactation stage at which feed efficiency should be measured is not documented. The lactation stage at which feed efficiency was measured in literature is highly variable in duration as well as in starting stage. The period duration goes from about 30 days (Davis *et al.*, 2014, Macdonald *et al.*, 2014) to whole lactation (Hurley *et al.*, 2016, Manafiazar *et al.*, 2016) and the starting stage varies from calving (Macdonald *et al.*, 2014, Tempelman *et al.*, 2015, Hurley *et al.*, 2016) to mid lactation or end (Macdonald *et al.*, 2014). The few studies reporting feed efficiency kinetic throughout lactation (Mantysaari *et al.*, 2012, Liinamo *et al.*, 2015, Hurley *et al.*, 2016) highlighted that feed efficiency at early lactation and at mid lactation were different traits. Recent research revealed that RFI assessed in two periods within the same productive period were weakly correlated with a maximum correlation of 0.58 within the same lactation in dairy cows for Mantysaari *et al.* (2012). As correlations for RFI within lactation are small in dairy cows, focussing only on part of lactation may lead to different efficiencies definitions and make the RFI not comparable between studies and complicated to use to build a selection index.

Considering the previously cited lack of information about lactation reference period at which feed efficiency should be measured in dairy cows, present study aimed at analysing residual energy intake (**REI**) repeatability throughout lactation and providing insight about this lactation reference period. The lactation was therefore subdivided into fortnights to compare fortnight REI with lactation estimated REI and to analyse the time structure of REI throughout lactation fortnights. To reduce part of REI variability which could be associated with measurement errors or with environmental conditions, REI was estimated using accurate and frequent measures of the traits and all cows were fed the same diet during whole lactation.

Material and methods

All data originated from an experiment specifically designed to better isolate differences in feed efficiency among lactating dairy cows. This experiment was carried out in two experimental farms with similar management practices and climatic conditions: INRA UMR PEGASE Méjusseume (Le Rheu, France) and Chambre d'Agriculture Les Trinottières (Montreuil-sur-Loir, France) in West France. The dataset consisted of 60 Holstein cows at the Méjusseume farm and 59 Holstein cows at Les Trinottières farm, 50% of cows in each farm were primiparous. Data were available from calving to 238 days in milk for all cows. Calving was seasonal with a calving season length of 56 days for Méjusseume and 93 days for Les Trinottières.

Diet

The same diets were fed from calving to dry off. Diets were offered *ad libitum* with a target refusals level of 10% per cow. The energy and protein density of the diets were estimated using the French system (INRA, 2010: **UFL** are amounts of net energy for lactation with 1 UFL equating to 7.12 MJ of net energy for lactation, and **PDIE** are amounts of metabolisable protein). At Méjusseume, cows were all fed the same diet based on maize silage, energy concentrate, soybean cake, dehydrated alfalfa and minerals. This diet had a net energy density of 0.93 UFL/kg DM and a metabolisable protein concentration of 94.3 g of PDIE/kg DM. At Les Trinottières, the 59 cows were split in two groups (30 and 29 cows) such that the first group had a diet balanced in energy and protein and the second group had a diet with a high protein density. The balanced diet had a net energy density of 0.94 UFL/kg DM and metabolisable protein concentration of 90.4 g of PDIE/kg DM; this diet consisted of maize silage, straw, rapeseed cake and minerals. The protein rich diet had a net energy density of 1 UFL/kg DM and a metabolisable protein concentration of 110.2 g of PDIE/kg DM; this diet consisted of maize silage, ryegrass silage, high moisture corn, dried beet pulp, soybean cake and minerals.

Measurements

On both farms, each cow had its own individual feed trough. Feed intake was measured daily for each cow as the difference between offered and the next morning's refusal weight. A bulk sample of each ingredient in the diets was analysed for composition. Analyses for DM were based on samples taken 5 times weekly for both farms for forages and once weekly at Méjusseume and once every 2 months at Les Trinottières for concentrates.

Cows were milked in the morning around 07:30 and in the afternoon around 16:00. Milk yield was measured at each milking. Milk fat content and protein content were measured twice weekly using 2 consecutive milkings for each measure (Milkoscan, Foss, Hillerød, Denmark). Net energy for lactation (**MilkE**) was calculated according to INRA (2010) as:

$$\text{MilkE} = \text{MY} \times \left[0.44 + (0.0055 \times (\text{FC} - 40)) + (0.0033 \times (\text{PC} - 31)) \right]$$

where MilkE represents the milk net energy in UFL/d, MY the milk yield in kg/d, FC the milk fat concentration in g/kg and PC the milk protein concentration in g/kg.

Body weight was measured after each morning milking using an automatic electronic scale. Body condition was scored on a scale from 0 for an emaciated cow to 5 for a fat cow with 0.25 unit increments (Bazin, 1984). Body condition score (**BCS**) was assessed twice monthly at Les Trinottières and monthly at Méjusseaume by 3 different scorers per farm. The average BCS of the 3 scorers was used in present study. These values were then smoothed using a cubic spline, with the measurement test-days as the knots, to interpolate daily BCS. The difference between BCS of two consecutive days was defined as daily BCS loss when the difference was negative and daily BCS gain when the difference was positive.

Energy Efficiencies

Lactation average efficiency calculation. Residual energy intake was calculated as the difference between actual and expected net energy intake on a per lactation basis and considered as our reference and called **REI_ref**. Thus, expected net energy intake (**NEI**) was calculated from a single multiple linear regression model fitted to all cows simultaneously where lactation mean observed NEI was regressed on the energy expenditure traits averaged over lactation; these traits were energy for milk production, for maintenance, and the sum over the lactation of daily body reserve loss and gain fitted separately in the model. Distinguishing body reserves loss and gain is important because gaining body reserves costs energetically more than the energy released from losing body reserves (Chilliard *et al.*, 1987). To account for size differences for a given BCS loss or BCS gain change, BCS loss and BCS gain were both multiplied by lactation mean BW. The multiple linear regression to estimate REI_ref was carried out using the lm function in R (R Core Team, 2016) with the following model.

$$\text{NEI}_j = \mu + a \times \text{MilkE}_j + b \times (\text{BW}^{0.75})_j + c \times (\text{BW}_j \times \Delta \text{BCS}^+_j) + d \times (\text{BW}_j \times \Delta \text{BCS}^-_j) + \text{REI_ref}_j \quad (1)$$

where NEI_j (UFL/d) is the mean NEI over the lactation for cow j ($j = 1$ to 119 cows), μ (UFL/d) is the intercept, $Milke_j$ (UFL/d) the mean Milke over the lactation for cow j , $(BW^{0.75})_j$ the lactation mean metabolic BW for cow j , $BW_j \times \Delta BCS^+_j$ the sum of daily positive BCS change over the lactation adjusted for BW (kg) for cow j , and $BW_j \times \Delta BCS^-_j$ the sum of daily negative BCS change over the lactation adjusted for BW (kg) for cow j , REI_{refj} (UFL/d) is the residual for cow j ; a, b, c, d are the model estimated coefficients.

Fortnight average efficiency calculation. Lactation was split in successive 14-day periods, called fortnight, to give 17 lactation sub-periods. Residual energy intake was calculated for each fortnight for each cow as the residual of two complementary approaches: one fitting a linear regression within each fortnight which REI will be called **REI_lin** and one fitting a mixed model with a repeated fortnight effect which REI will be called **REI_mix**. Both models fitted fortnight average NEI over fortnight averages for both Milke and metabolic BW and over the fortnightly sum of daily BCS change. Both models resulted in 17 REI per cow. The linear approach will be used to analyse the steadiness of regression coefficients, residual standard deviation and coefficient of determination throughout the 17 fortnights. The mixed model approach will be used to analyse REI time structure throughout the lactation. The mixed model was therefore built with a repeated fortnight effect which was unstructured. The mixed model was fitted using PROC MIXED procedure in SAS 9.1 with an unstructured time matrix assumed among repeated records within animal. The linear regression was fitted using lm function in R (R Core Team, 2013). To analyse the time structure, we analysed the correlation of REI_mix between fortnights and between REI_mix and REI_ref, as well as the kinetic of REI_mix throughout the lactation.

Results

Descriptive statistics

Except for traits of body reserves change, the traits assessed on both timescales had similar means and SD (Table 1), thus similar CV between 8.8% for metabolic BW and 22.4% for milk fat yield. Traits of body reserves change were more variable than other traits and had CV between 137.5% for BCS gain and 185.7% for BCS loss for timescale fortnight. Concerning the feed efficiency traits, REI_ref was 1.6 times less variable than REI_lin and 2.5 times less variable than REI_mix (Table 1).

Table 1 Mean and coefficient of variation (CV) of net energy intake (NEI), energy expenditure traits and residual energy intake (REI) for lactation and fortnight databases.

Trait	Mean		CV (%)	
	lact. ¹	fort. ²	lact. ¹	fort. ²
NEI (UFL/d)	20.7	20.7	13.5	17.9
Energy expenditure traits				
MilKE (UFL/d)	13.7	13.7	17.5	19.7
Milk Yield (kg/d)	31.4	31.4	16.6	19.1
Milk Fat yield (g/d)	1,229	1,226	20.3	22.4
Milk Protein Yield (g/d)	999	997	16.3	18.2
BCS loss ³	1.25	0.07	75.2	185.7
BCS gain ³	1.29	0.08	53.5	137.5
BCS balance ³	0.04	0.00	NA	NA
BCS	2.36	2.36	20.8	22.9
BW ^{0.75} (kg ^{0.75})	125	125	8.8	8.8
Feed efficiency traits				
REI_ref (UFL/d)	0.0	/	3.9 ⁶	/
REI_mix ⁴ (UFL/d)	/	-0.6	/	9.7 ⁶
REI_lin ⁵ (UFL/d)	/	0	/	6.3 ⁶

MilKE = Net Energy of Lactation; BCS = Body Condition Score (scale from 0 to 5); BW^{0.75} = metabolic BW; 1 UFL = 7 115 kJ of net energy

¹ description of lactation database (1 data / cow / lactation).

² description of fortnight database (1 data / cow / fortnight).

³ unit depends on timescale used: for lactation timescale BCS change is over whole lactation and for fortnight timescale, BCS change is over a fortnight.

⁴ REI assessed with the mixed model procedure including fortnight as repeated effect.

⁵ REI assessed with the linear regression procedure adjusted within each fortnight.

⁶ Because REI are centered into 0 for REI_ref and REI_lin, the CV of REI_ref, REI_mix and ReI_lin were estimated as the ratio between SD of REI and mean NEI.

Steadiness of model regression coefficient throughout the lactation

The regression coefficients and the quality of fit extracted from the linear model fitted within each fortnight were variable at lactation start and most of them became steady from fortnight 6 to 8 on (Figure 1). Indeed the regression coefficient for MilKE increased from 0.35 at fortnight 1 to 0.80 UFL/UFL at fortnight 7 to stay steady until end of lactation and closer to the equivalent coefficient got in the lactation average model (Table 2). In the same way, the adjusted coefficient of determination increased from 0.52 at fortnight 1 to 0.86 at fortnight 7 and residual standard deviation decreased from 2.0 at fortnight 1 to 1.2 at fortnight 8. However both intercept and regression coefficient for body reserves change remained variable throughout the lactation with an intercept between -0.3 and -6.8 UFL/d and a regression

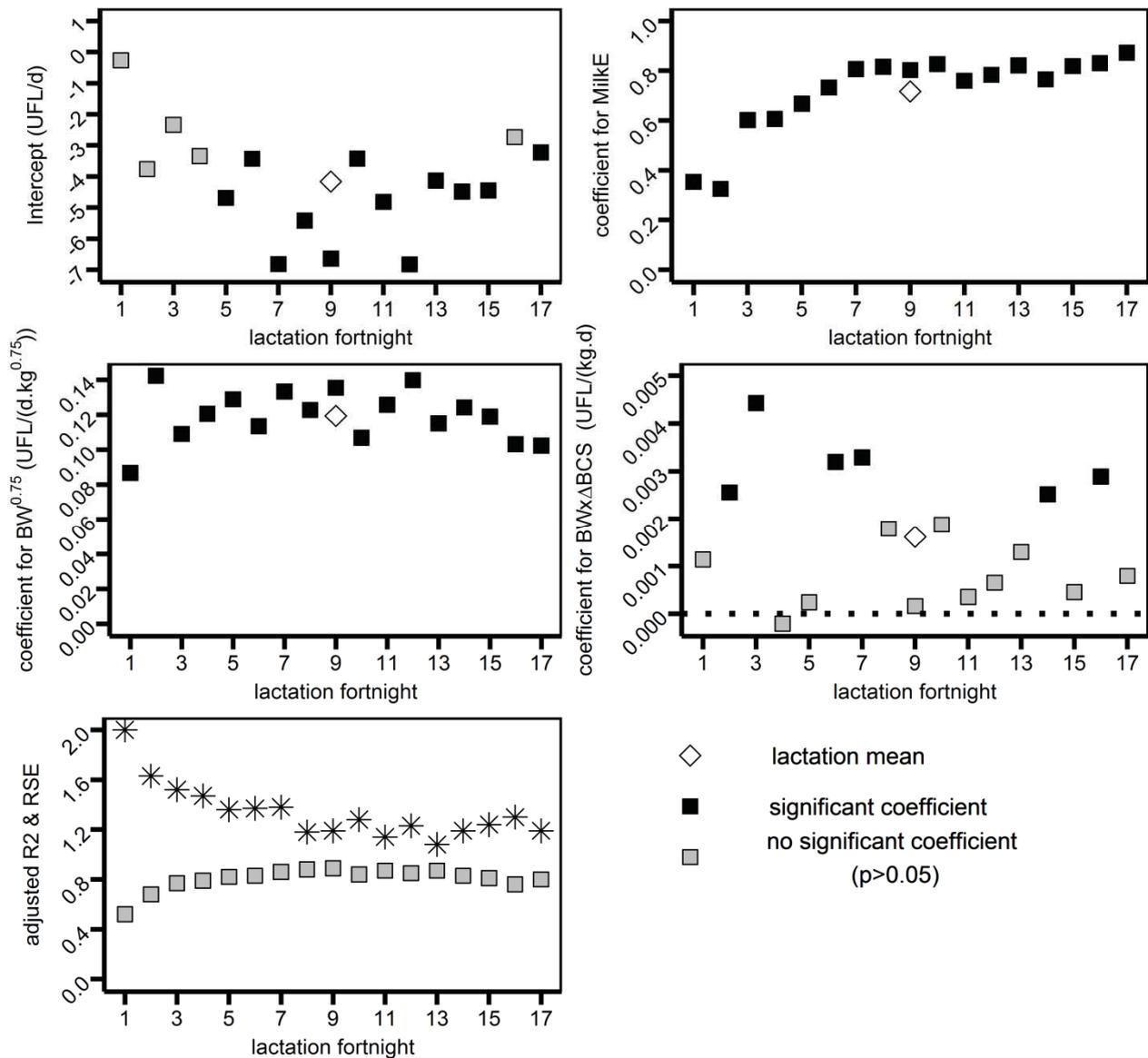


Figure 1 Kinetic of the regression coefficients for metabolic body weight (metabolic BW), for milk net energy output (MilKE) and for body reserves change ($BW \times \Delta BCS$), as well as the kinetic of the adjusted coefficient of determination (adjusted R²) and the residual standard error (RSE) of the linear regression adjusted within each fortnight, i.e. used to estimate REI_{lin}.

Table 2 Coefficients and quality of fit resulting from linear modelling on lactation timescale (Lact.) and on fortnight timescale (Fort.) either with mixed model (Mix) or linear model adjusted within fortnight (LIN).

Model	Intercept		MilKE		BW ^{0.75}		BW x ΔBCS ⁻		BW x ΔBCS ⁺		BW x ΔBCS		RSE	R ²
	μ	P	Coef.	P	Coef.	P	Coef.	P	Coef.	P	Coef.	P		
Lact.	-1.7	ns	0.84	***	0.08	***	-0.0012	***	0.0015	***			0.8	0.92
Fort.														
Mix	-7.7	***	0.79	***	0.14	***					8.3.10 ⁻⁴	***	1.8	/
LIN ¹	-4.2	ns ²	0.72	***	0.12	***					0.0016	ns ³	1.3	0.81

RSE = residual standard error; ns = coefficient not significantly different from 0; MilKE = net energy in milk (UFL/d); BW^{0.75} = metabolic BW (kg^{0.75}); ΔBCS⁻ = body condition score loss over a fortnight, is a positive variable; ΔBCS⁺ = body condition score gain over a fortnight; ΔBCS = body condition change loss over a fortnight, it can be positive when the balance over the fortnight is positive or negative when the balance is negative; Coef. = coefficient (UFL/UFL for MilKE, UFL/kg^{0.75}.d for BW^{0.75}, UFL/kg.d.unit ΔBCS⁻ for BW x ΔBCS⁻, UFL/kg.d.unit ΔBCS⁺ for BW x ΔBCS⁺, UFL/kg.d.unit ΔBCS for BW x ΔBCS); μ = intercept (UFL/d); 1 UFL = 7 115 kJ of net energy.

¹ estimates for the coefficients, R² and RSE are mean of the parameters estimated for each of the 17 fortnights using a linear regression fitted within each fortnight.

² coefficients not significantly different from 0 for fortnights 1 to 4 and 16 (P > 0.05).

³ coefficients not significantly different from 0 for fortnights 1, 4, 5, 8 to 13, 15 and 17 (P > 0.05).

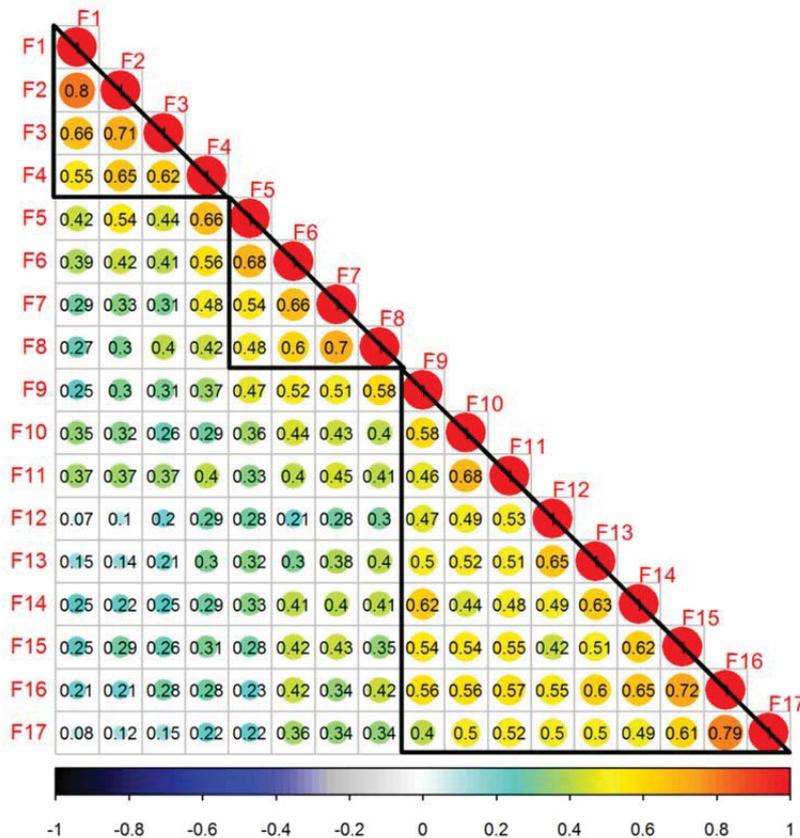


Figure 2 Coefficient of correlation matrix of residual energy intake assessed for the 17 lactation fortnights and identification of efficient similar periods of lactation: fortnight 1 to 4 (F1 to F4), 5 to 8 (F5 to F8) and 9 to 17 (F9 to F17).

coefficient for body reserves change between 0 and 0.0044 UFL/unit BCS per kg and per day (Figure 1). Considering their absolute value, the intercept was multiplied by 2.5 and the regression coefficient of body reserves change was slightly higher when using fortnight averages compared to their equivalent in the reference model fitted using lactation averages (Table 2).

Analysing the kinetic of residual energy intake throughout lactation

The matrix of correlation of REI_mix between the 17 fortnights is given in Figure 2 and the kinetic of REI_mix throughout the lactation and its correlation with REI_ref are given in Figure 3A and 3B. The correlation matrix for REI_mix highlighted that the lactation was not homogeny structured throughout time but rather that lactation was split in three homogenous periods: very early lactation with the first 4 fortnights, early mid-lactation with fortnights 5 to 8 and late mid-lactation with fortnights 9 to 17 (Figure 2). The correlations were steady within each of these three periods with average correlation between 0.55 (+/- 0.08) for late mid-lactation and 0.67 (+/- 0.08) for very early lactation. The correlations between the three periods were smaller than within and were the smallest between very early lactation and late mid-lactation (mean $r = 0.25$) and were the greatest between the 2 earliest periods (mean $r = 0.42$).

The kinetic of REI_mix throughout lactation and of the correlation between REI_mix and REI_ref became steady from fortnight 5 on (Figures 3 A and 3B). During the first 4 lactation fortnights average REI_mix was negative and more variable (Figure 3A) compared to the rest of lactation where REI_mix average became null and had a steady and smaller variation. In the same way the kinetic of Pearson correlation between each fortnight REI_mix with the lactation reference REI_ref showed that the first 3 fortnights and the last one had a lower correlation which was around 0.4 compared to rest of lactation where correlations were around 0.6 (Figure 3B). These correlations were highest between fortnight 5 and 9 and between 14 and 16.

Comparing the use of lactation averages to the use of fortnight averages

The comparison of the regression coefficients and quality of fit of the three models are presented in Table 2. Using traits averaged over the lactation gave the highest coefficient of determination with 0.92 compared to 0.81 for the linear regression using fortnight averages and gave the lowest residual standard deviation with 0.8 UFL/d compared to 1.3 UFL/d for the fortnight linear and 1.8 UFL/d for the fortnight mixed model. The regression coefficients

were different between fortnight models and lactation average model. The coefficient for Milke was 0.84 for lactation model and was slightly lower for both fortnight models. For metabolic BW the coefficient was $0.08 \text{ UFL/kg}^{0.75}$ in lactation model which was 1.5 times lower than the equivalent in the fortnight linear model and 1.75 times lower than the equivalent in the fortnight mixed model (Table 2). For body reserves change, lactation model had coefficients intermediary between fortnight mixed model with a coefficient of $8.3 \cdot 10^{-4}$ UFL/unit BCS per kg BW and per day and of 0.0016 UFL/unit BCS per kg BW and per day for fortnight linear model (Table 2).

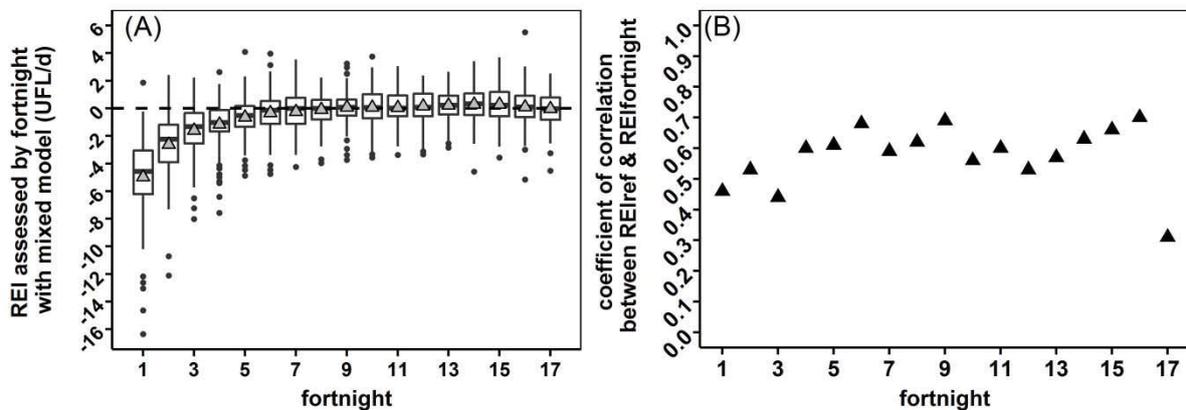


Figure 3 (A) Kinetic of mean residual energy intake (REI) estimated per fortnight throughout lactation and (B) kinetic of the coefficient of correlation between REI estimated using fortnight averaged variables with REI estimated using lactation averaged variables (REI_{ref}).

Discussion

All results converged to say that REI estimated at lactation start from fortnight 1 to around fortnight 5-7 behaved completely differently from rest of lactation and were biased. These results suggest to avoid the first 7 fortnights when estimating feed efficiency with REI. The increase in Pearson correlation of fortnight REI with lactation averaged REI from fortnight 1 to 9 was also found in literature by Prendiville *et al.* (2011) where Pearson correlations increased from 0.47 at first month to 0.71 at sixth month of lactation. The lactation appeared structured in three different periods whose REI were highly correlated within and poorly correlated between periods: fortnight 1 to 4, 5 to 8 and 9 to 17. These three periods were also observed by Mantysaari *et al.* (2012) who had similar correlations between periods compared to our results with the least correlated being very early lactation (fortnights 1 to 5) and late mid-lactation (fortnights 11 to 15) and the most correlated being very early lactation and early mid-lactation (fortnights 6 to 10). The very early lactation was characterised by fortnights

having a negative and more variable REI compared to rest of lactation, which was also reported by Mantysaari *et al.* (2012) during the first 4 fortnights, by Hurley *et al.* (2016) during the first 2.5 fortnights and by Prendiville *et al.* (2011) during the first month. These lower correlations between REI from the very early lactation and rest of lactation, as well as the more variable regression coefficients and more variable REI during the very early lactation compared to rest of lactation, suggest that REI is not a repeatable measure throughout lactation. Repeatability and heritability estimates reported in literature are highly variable, going from 0 to 0.41 (Berry and Crowley, 2013, Yao *et al.*, 2017, Tempelman *et al.*, 2015) and repeatability around 0.76 (Tempelman *et al.*, 2015) and 0.77 (Prendiville *et al.*, 2011). Repeatability and heritability were variable throughout the lactation with the highest found at the very early lactation and at late lactation (Prendiville *et al.*, 2011, Liinamo *et al.*, 2015, Tempelman *et al.*, 2015). The variability of repeatability and heritability in literature highlights that estimating feed efficiency variability with REI still needs to be improved, especially to have a homogenous estimate of feed efficiency across studies to make the REI comparable.

The negative means of REI_mix we observed during the first 4 fortnights can be interpreted as an average expected NEI higher than the average actual NEI. This difference could either be due to an underestimation of actual NEI or to an overestimation of the energy requirements for all cows.

Underestimating actual NEI at lactation start would imply that, in spite of a constant diet composition, the same amount of diet has not the same net energy value at early and rest of lactation. This value difference across lactation could be explained by a decrease in diet digestibility associated with the increase in intake level (Le Liboux and Peyraud, 1998) occurring during the first lactation fortnights. However the rare studies which measured digestibility throughout the first lactation weeks suggest the opposite because digestibility tended to decrease during the first weeks post-partum (Doreau *et al.*, 1982).

Overestimating expected NEI would imply an overestimation of all traits having a positive effect on NEI or an underestimation of the traits having a negative effect on NEI. The risks to overestimate MilKE are small because MilKE was directly estimated in net energy and was not an indirect measure of net energy in milk. However the increase of MilKE regression coefficient throughout the lactation suggests that the model overestimates the efficiency of converting metabolisable energy into milk at lactation beginning. This overestimation could be due to an underestimation of the efficiency of metabolisable energy utilisation. Indeed, net energy intake was estimated with a constant efficiency of metabolisable energy utilisation for

milk. At lactation beginning, part of the net energy in milk is produced with energy from body reserves mobilisation which is more efficient than producing milk from the nutrients (Moe *et al.*, 1971). These results suggested that the energy mobilised in body reserves was not included in the model while it was, which suggests that mobilisation was probably not measured accurately enough.

Maintenance expenditures could have had overestimated at lactation start. Using metabolic BW as proxy of maintenance requirement is common (Cannas *et al.*, 2010) with the limit that BW hides several components, other than body reserves which varies throughout the lactation. Body weight is indeed the sum of digestive tract, body reserves and bones mass. Knowing that DM intake is low and increases during the first lactation fortnights and remained steady for rest of lactation (Figure 4), the part of maintenance energy requirement associated with digestive tract is expected to be lower in early lactation than during rest of lactation. Assuming that 45 to 55% of maintenance energy expenditure in ruminants are associated with digestive tract size and weight (Cannas *et al.*, 2010), maintenance expenditure are thus expected to be lower at lactation start compared to rest of lactation. In pigs (Noblet *et al.*) (2010) reported that feeding level, i.e. digestive tract content, was positively related with fasting heat production and thus with maintenance expenditure. Including feed intake level in maintenance expenditure estimation would certainly improve the estimation of maintenance expenditure and thus reduce expected NEI and render mean REI closer to zero at lactation start. However this correction is not feasible because introducing a variable which is defined with the dependent variable of the model, i.e. NEI, is statistically tricky.

Body reserves change was probably underestimated at lactation start and maybe not well estimated on a short time period, as suggested by the highly variable regression coefficient throughout the lactation. When fitted within each fortnight, the coefficient for body reserves change was the coefficient which was the most variable across the 17 fortnights and when modelled over the 17 fortnights, the coefficient was 1.6 times smaller than the equivalent coefficient in the reference lactation average model. This unsteadiness and underestimation of body reserves coefficient suggest that body reserves change was not well estimated and even worse on a fortnight timescale than lactation timescale. Having more frequent measures of body reserves would probably increase the accuracy of the estimation. However the used method which was BCS is not adapted to frequent measures, especially because scoring is time-consuming and becomes subjective when dates are too close in time. An automatic

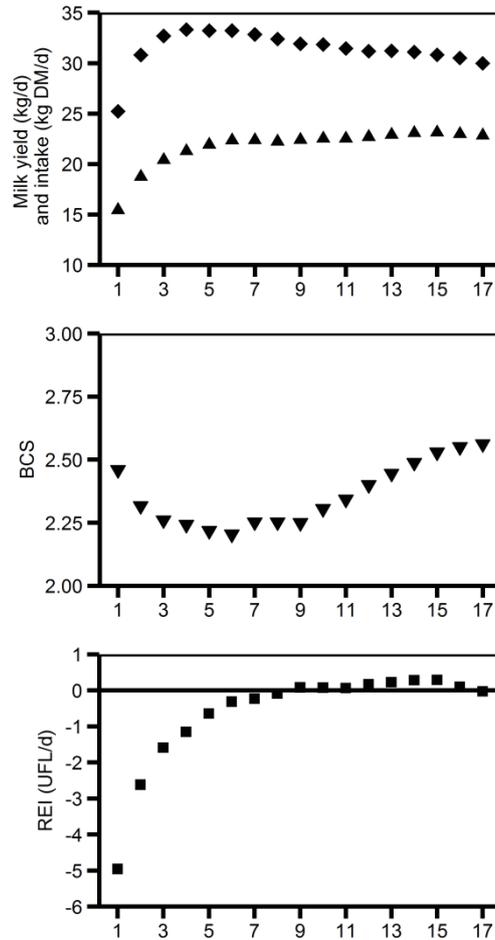


Figure 4 Kinetic of dry matter intake (▲), milk yield (◆), body condition score (BCS, ▼) and residual energy intake (REI, ■) throughout the 17 lactation fortnights.

method to estimate BCS, such as proposed in Fischer *et al.* (2015), would enable broadband and objective measures of BCS and thus should be more accurate to detect quick changes in body reserves. However the linear relationship between BCS change and lipid change is not well established. Further investigation is needed to describe the relationship between BCS change and body composition change in protein and lipids, for example using ultrasonography. Other methods could be used to estimate body reserves change. Among these methods, BW change is often used (Mantysaari *et al.*, 2012, Hurley *et al.*, 2016) but is difficult to analyse because it hides change in digestive tract contents, uterine involution at lactation start and body reserves change. Using empty BW (Manafiazar *et al.*, 2016), which is BW subtracted with digestive contents and milk yield, is statistically not correct because digestive contents are usually assessed from DM intake, resulting in an indicator dependent on the dependent variable of the model.

Another possible reason for having a worse estimation of the coefficients and of REI at lactation start may be the simultaneous fast changes in several traits (Figure 4). Beginning of lactation is characterised by an increase in DM intake, milk synthesis and a decrease in BCS, which may be associated with the observed negative and more variable REI at lactation beginning (Figure 4). The unsteadiness of REI at the beginning of the lactation may therefore be due to the inability of the used methods to properly measure the fast changes occurring simultaneously for all traits.

Conclusion

The present study focused on identifying when to measure residual energy intake throughout the lactation to have a robust estimation of dairy cows lactation feed efficiency. The results suggested to avoid the first 5 fortnights of lactation, especially to have an estimation of residual energy intake not biased. This bias in the estimation of residual energy intake at beginning of lactation may be due to a lack of accuracy in the used methods, especially in estimating quickly changes, such as loss of body condition score. Indeed the beginning of the lactation combines fast and simultaneous changes in energy supply (intake and body reserves mobilisation), as well as in energy requirements (maintenance and milk), which are difficult to measure and may explain why feed efficiency is difficult to estimate at lactation beginning.

Acknowledgements

Authors would warmly thank all the technicians and persons from INRA Méjusseume farm and Les Trinottières (Chambre d'agriculture 49) farm who helped managing and monitoring this long-term experimentation. This work was funded by the national project Deffilait (ANR-15-CE20-0014) and ApisGene.

References

- Bazin S 1984. Grille de notation de l'état d'engraissement des vaches Pie Noires. Institut technique de l'élevage bovin, Paris, France.
- Berry DP and Crowley JJ 2013. CELL BIOLOGY SYMPOSIUM: Genetics of feed efficiency in dairy and beef cattle. *Journal of Animal Science* 91, 1594-1613.
- Cannas A, Atzori AS, Teixeira IAMA, Sainz RD and Oltjen JW 2010. The energetic cost of maintenance in ruminants: from classical to new concepts and prediction systems. In *Energy and protein metabolism and nutrition*. 3rd EAAP International Symposium on

- Energy and Protein Metabolism and Nutrition, 06-10/09/2010, Parma, Italy, pp. 531-542.
- Chilliard Y, Rémond B, Agabriel J, Robelin J and Verite R 1987. Variations du contenu digestif et des réserves corporelles au cours du cycle gestation-lactation. Bulletin Technique C. R. Z. V. de Theix 70, 117-131.
- Davis SR, Macdonald KA, Waghorn GC and Spelman RJ 2014. Residual feed intake of lactating Holstein-Friesian cows predicted from high-density genotypes and phenotyping of growing heifers. Journal of Dairy Science 97, 1436-1445.
- Doreau M, Rémond B, Fléchet J, Lefaivre R, Ollier A and Sornet C 1982. Comportement alimentaire et utilisation digestive d'une ration de composition constante chez la vache laitière en fin de gestation et début de lactation. Reproduction Nutrition Développement 22, 307-324.
- Fischer A, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2015. Rear shape in 3 dimensions summarized by principal component analysis is a good predictor of body condition score in Holstein dairy cows. Journal of Dairy Science 98, 4465-4476.
- Hurley AM, López-Villalobos N, McParland S, Kennedy E, Lewis E, O'Donovan M, Burke JL and Berry DP 2016. Inter-relationships among alternative definitions of feed efficiency in grazing lactating dairy cows. Journal of Dairy Science 99, 468-479.
- Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) 2010. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeurs des aliments: tables Inra 2007 mise à jour 2010. Editions Quae, Versailles, France.
- Koch RM, Swiger LA, Chambers D and Gregory KE 1963. Efficiency of feed use in beef cattle. Journal of animal science 22, 486-494.
- Le Liboux S and Peyraud JL 1998. Effect of forage particle size and intake level on fermentation patterns and sites and extent of digestion in dairy cows fed mixed diets. Animal Feed Science and Technology 73, 131-150.
- Liinamo AE, Mäntysaari P, Lidauer MH and Mäntysaari EA 2015. Genetic parameters for residual energy intake and energy conversion efficiency in Nordic Red dairy cattle. Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science 65, 63-72.
- Macdonald KA, Pryce JE, Spelman RJ, Davis SR, Wales WJ, Waghorn GC, Williams YJ, II, Marett LC and Hayes BJ 2014. Holstein-Friesian calves selected for divergence in residual feed intake during growth exhibited significant but reduced residual feed intake divergence in their first lactation. Journal of Dairy Science 97, 1427-1435.

- Manafiazar G, Goonewardene L, Miglior F, Crews DH, Basarab JA, Okine E and Wang Z 2016. Genetic and phenotypic correlations among feed efficiency, production and selected conformation traits in dairy cows. *Animal* 10, 381-389.
- Mantysaari P, Liinamo AE and Mantysaari EA 2012. Energy efficiency and its relationship with milk, body, and intake traits and energy status among primiparous Nordic Red dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 95, 3200-3211.
- Martin O and Sauvant D 2010. A teleonomic model describing performance (body, milk and intake) during growth and over repeated reproductive cycles throughout the lifespan of dairy cattle. 1. Trajectories of life function priorities and genetic scaling. *Animal* 4, 2030-2047.
- Moe PW, Tyrrell HF and Flatt WP 1971. Energetics of Body Tissue Mobilization. *Journal of Dairy Science* 54, 548-553.
- Noblet J, Dubois S, Labussière E, Carré B and Van Milgen J 2010. Metabolic utilization of energy in monogastric animals and its implementation in net energy system. In *Energy and protein metabolism and nutrition. 3rd EAAP International Symposium on Energy and Protein Metabolism and Nutrition, 06-10/09/2010, Parma, Italy*, pp. 574-582.
- Prendiville R, Pierce KM, Delaby L and Buckley F 2011. Animal performance and production efficiencies of Holstein-Friesian, Jersey and Jersey x Holstein-Friesian cows throughout lactation. *Livestock Science* 138, 25-33.
- Puillet L, Réale D and Friggens NC 2016. Disentangling the relative roles of resource acquisition and allocation on animal feed efficiency: insights from a dairy cow model. *Genetics Selection Evolution* 48, 72 (2-16).
- R Core Team 2013. R: A language and environment for statistical computing. In *R foundation for Statistical Computing.*, Vienna, Austria.
- Robinson DL 2005. Assessing the accuracy of modelling weight gain of cattle using feed efficiency data. *Livestock Production Science* 95, 187-200.
- Tempelman RJ, Spurlock DM, Coffey M, Veerkamp RF, Armentano LE, Weigel KA, de Haas Y, Staples CR, Connor EE, Lu Y and VandeHaar MJ 2015. Heterogeneity in genetic and nongenetic variation and energy sink relationships for residual feed intake across research stations and countries. *Journal of Dairy Science* 98, 2013-2026.
- Yuan J, Dou T, Ma M, Yi G, Chen S, Qu L, Shen M, Qu L, Wang K and Yang N 2015. Genetic parameters of feed efficiency traits in laying period of chickens. *Poultry Science* 94, 1470-1475.

II. Isolement de la part du residual energy intake associée à l'individu et non aux erreurs de mesure et d'ajustement de modèle²

Isolating the cow-specific part of residual energy intake in lactating dairy cows using random regressions

Isolement de la composante individuelle de l'énergie ingérée résiduelle en utilisant des régressions à effet aléatoire chez la vache laitière

A. Fischer, N. C. Friggens, D.P. Berry and P. Faverdin

Original Research Article – Under review in ANIMAL

Résumé

La capacité à estimer correctement et à mesurer précisément les différences d'efficacité alimentaire entre vaches laitières est essentielle pour développer un programme de sélection visant à améliorer l'efficacité alimentaire. La variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire est souvent décrite par l'approche du residual energy intake. Le residual energy intake est défini par le résidu d'une régression linéaire des quantités ingérées en fonction des quantités nécessaires pour le fonctionnement des fonctions biologiques qui consomment (ou libèrent) de l'énergie. Cependant, les résidus d'un tel modèle statistiques incluent toutes les erreurs d'ajustement de modèle et de mesures des variables, ainsi que la variabilité de l'efficacité alimentaire de la vache.

L'objectif de cette étude a été d'isoler la composante du residual energy intake qui est associée à de la variabilité interindividuelle d'efficacité alimentaire. Dans un premier temps le residual energy intake classique (**REI**) a été calculé comme le résidu d'une régression linéaire multiple de l'énergie nette ingérée (**ENI**) moyennée sur la lactation en fonction de la perte et du gain de note d'état corporel cumulé sur la lactation et de la moyenne sur la lactation du poids vif métabolique et de l'énergie nette du lait. Dans un second temps un modèle mixte a été utilisé pour qu'aux coefficients de régression et ordonnée à l'origine moyenne de la population soient ajoutés des coefficients de régression et une ordonnée à l'origine spécifique à chaque vache. Cette méthode subdivise donc l'ENI attendue en deux parties : une estimée avec l'ordonnée à l'origine et les coefficients moyens de la population, et

² Cette deuxième partie est présentée selon les recommandations du journal ANIMAL et a été soumise et est actuellement en cours de relecture. Le résumé est une traduction du résumé de l'article soumis.

une estimée à partir de l'écart obtenus avec les paramètres spécifiques à la vache par rapport à aux paramètres moyens de la population. Cette part de l'ENI attendue qui est spécifique à chaque vache a été considérée comme de la variabilité interindividuelle associée à l'efficience alimentaire. L'ENI et les phénotypes associés aux postes de dépenses énergétiques étaient disponibles pour les 17 premières quinzaines de lactation pour 119 vaches Holstein, toutes alimentées avec une ration unique riche en énergie. Différentes combinaisons de l'ordonnée à l'origine spécifique à chaque vache et de chacun des coefficients de régression spécifiques à chaque vache ont été testées.

La variance du REI estimé à partir du modèle lactation moyenne ne représentait que 8% de la variance de l'ENI mesurée. La variance de la part de l'ENI attendue spécifique à chaque vache représentait, selon le modèle mixte considéré, entre 52 et 59% de la variance du REI estimé avec le modèle lactation moyenne, c'est-à-dire de 4 à 9% de la variance de l'ENI mesurée. Les 41 à 49% restants devraient par conséquent être des erreurs d'ajustement ou de mesures. En conclusion, l'utilisation d'un modèle mixte avec des régressions aléatoires individualisées par vache semble être une méthode prometteuse pour isoler la composante individuelle dans le residual energy intake chez la vache laitière.

Isolating the cow-specific part of residual energy intake in lactating dairy cows using random regressions

A. Fischer^{1,2}, N. C. Friggens³, D.P. Berry⁴ and P. Faverdin²

¹ Department of animal husbandry techniques and environment, Institut de l'élevage, Monvoisin, 35650 Le Rheu, France

² UMR 1348 PEGASE, INRA, Agrocampus-Ouest, domaine de la Prise, 35590 Saint-Gilles, France

³ INRA UMR 0791 Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 75005 Paris, France

⁴ Teagasc, Animal & Grassland Research Innovation Centre, Moorepark, Fermoy Co. Cork, Ireland

Corresponding author: Philippe Faverdin. E-mail: philippe.faverdin@inra.fr

Short title: Cow-specific variability in residual energy intake

Abstract

The ability to properly assess and accurately phenotype true differences in feed efficiency among dairy cows are key to the development of breeding programs for improving feed efficiency. The variability among individuals in feed efficiency is commonly characterised by the residual intake approach. Residual feed intake is represented by the residuals of a linear regression of intake on the corresponding quantities of the biological functions that consume (or release) energy. However, the residuals of such a statistical model include both, model fitting and measurement errors as well as any variability in cow efficiency. The objective of this study was to isolate the true individual animal variability in feed efficiency from the residual component. First, the standard residual energy intake (**REI**) was calculated as the residual of a multiple linear regression of lactation average net energy intake (**NEI**) on lactation average milk energy output, average metabolic BW, as well as lactation loss and gain of body condition score. Then a mixed model framework was used to add cow-specific regression coefficients and a cow-specific intercept to the population average coefficients on the biological traits and intercept. This method split the predicted NEI in two parts: one quantifying the population mean intercept and coefficients, and one quantifying cow-specific deviations in the intercept and coefficients. The cow-specific part of predicted NEI was

assumed to isolate true differences in feed efficiency among cows. NEI and associated energy expenditure phenotypes were available for the first 17 fortnights of lactation from 119 Holstein cows; all fed a constant energy-rich diet. Mixed models fitting cow-specific intercept and coefficients to different combinations of the aforementioned energy expenditure traits, calculated on a fortnightly basis, were compared. The variance of REI estimated with the lactation average model represented only 8% of the variance of measured NEI. Among all compared mixed models, the variance of the cow-specific part of NEI represented between 52 and 59% of the variance of REI estimated from the lactation average model or between 4 and 5% of the variance of measured NEI. The remaining 41 to 48% of the variance of REI estimated with the lactation average model may therefore reflect model fitting errors or measurement errors. In conclusion, the use of a mixed model framework with cow-specific random regressions seems to be a promising method to isolate the cow-specific component of residual energy intake in dairy cows.

Key-words: feed efficiency, mixed model, cattle, lactation, individual variation

Implications

Feed efficiency in dairy cows is of growing interest to reduce the use of feed on-farm without compromising animal performance. Improving feed efficiency should focus on individual animal variability in feed efficiency. In the present study of lactating dairy cows, the variability in feed efficiency which is specific to the animal was isolated using mixed models. In the present study, the variability of this component of efficiency represented only 4 to 5% of energy intake variability, but the 10% most efficient cows ate 8.5 MJ/day less net energy than the mean of the population.

Introduction

Achieving greater feed efficiency is one possible solution to improve the sustainability of animal production, as it implies using fewer resources (i.e. animal feedstuffs and the land to grow it) for a given level of animal production, or indeed a greater production for the same level of resources. Feed efficiency is often represented as residual feed intake (**RFI**), at least in the scientific literature (Berry and Crowley, 2013). Residual feed intake is defined as the difference between actual and expected feed intake. Expected feed intake is calculated as the sum of the estimated expenditures for the main biological functions, such as average daily gain and maintenance in growing animals, or lactation production, maintenance, and body

reserves change in lactating animals (Berry and Crowley, 2013). Each biological function has an associated efficiency for the conversion of feed energy into this function and this is referred to as a partial efficiency. The partial efficiencies of the main biological functions are usually estimated by the regression coefficients of a single population-wide least squares regression model relating actual feed intake to the corresponding values of these biological functions. In such models, RFI is represented as the residuals of the linear regression (Dekkers and Gilbert, 2010, Aggrey and Rekaya, 2013, Berry and Crowley, 2013). A positive RFI means that the animal ate more than expected based on the sample population and is therefore deemed to have a poorer efficiency. Conversely, when RFI is negative, the animal is deemed to be more efficient than the average animal of the sample population.

The variability in RFI includes true differences in feed efficiency but also includes errors due to inaccuracies in the measurement of the variables in the model, as well as errors due to model fitting. The variance of RFI is therefore highly dependent on the accuracy of the tools used to measure the individual components in the model (Robinson, 2005). The component of RFI that is attributable to true differences in feed efficiencies can be split into the individual deviations from the population average of the partial efficiencies of the different traits in the model, and also individual differences in biological functions that are not directly included in the model. Given this, it seems reasonable to explore methods for isolating, from RFI, the cow-specific variability in the partial efficiencies associated with each of the energy expenditures included in the model.

Methods to directly measure cow-specific partial efficiencies for the main biological functions, using approaches such as metabolic chambers, are not adapted for use in large populations. However, an indirect method, already documented in beef cattle (Saviotto *et al.*, 2014), dairy cows (Mehtiö *et al.*, 2016) and broilers (Aggrey and Rekaya, 2013), is to fit a mixed model with animal-specific regression coefficients for each of the biological traits in the model. In this approach, the cow-specific variability in partial efficiencies is no longer consigned to the residuals of the model but instead is captured by the cow-specific regression coefficients and intercept. These cow-specific regression coefficients can then be used to calculate the cow-specific expected net energy intake (**NEI**) as a deviation from the population mean expected NEI (Aggrey and Rekaya, 2013).

The objective of present study was to isolate the cow-specific variability in residual energy intake in dairy cows. To minimise the part of residual energy intake which could be due to measurement errors, the experiment was carried out in a steady environment during the whole lactation using high-throughput monitoring of feed intake and of the phenotypes associated

with the main energy expenditures. First, the residual energy intake (**REI**) was calculated as the residuals of a multiple linear regression of lactation average NEI on the biological traits usually used to estimate the main energy expenditures. Then, a mixed model framework was used to add cow-specific regression intercept and coefficients to the classical intercept and coefficients of the biological traits in the model. The resulting cow-specific part of predicted NEI was compared to the REI estimated with the lactation average model. Moreover, the partial efficiencies of each biological trait in the model were estimated in NEI unit and compared to each other to investigate if, for a given function, partial efficiency differences between cows were a possible explanation of the overall feed efficiency differences.

Material and methods

All data originated from an experiment specifically designed to better isolate differences in feed efficiency among lactating dairy cows. This experiment was carried out in two experimental farms with similar management practices and climatic conditions: INRA UMR PEGASE Méjusseume (Le Rheu, France) and Chambre d'Agriculture Les Trinottières (Montreuil-sur-Loir, France) in West France. The dataset consisted of 60 Holstein cows at the Méjusseume farm and 59 Holstein cows at Les Trinottières farm, 50% of cows in each farm were primiparous. Data were available from calving to 238 days in milk for all cows. Calving was seasonal with a calving season length of 56 days for Méjusseume and 93 days for Les Trinottières.

Diet

The same diets were fed from calving to dry off. Diets were offered ad libitum with a target refusals level of 10% per cow. The energy and protein density of the diets were estimated using the French system (INRA, 2010: UFL are amounts of net energy for lactation with 1 UFL equating to 7.12 MJ of net energy for lactation, and PDIE are amounts of metabolisable protein). At Méjusseume, cows were all fed the same diet based on maize silage, energy concentrate, soybean cake, dehydrated alfalfa and minerals. This diet had a net energy density of 0.93 UFL/kg DM and a metabolisable protein concentration of 94.3 g of PDIE/kg DM. At Les Trinottières, the 59 cows were split in two groups (30 and 29 cows) such that the first group had a diet balanced in energy and protein and the second group had a diet with a high protein density. The balanced diet had a net energy density of 0.94 UFL/kg DM and metabolisable protein concentration of 90.4 g of PDIE/kg DM; this diet consisted of maize silage, straw, rapeseed cake and minerals. The protein rich diet had a net energy density of 1

UFL/kg DM and a metabolisable protein concentration of 110.2 g of PDIE/kg DM; this diet consisted of maize silage, ryegrass silage, high moisture corn, dried beet pulp, soybean cake and minerals.

Measurements

On both farms, each cow had its own individual feed trough. Feed intake was measured daily for each cow as the difference between offered and the next morning's refusal weight. A bulk sample of each ingredient in the diets was analysed for composition. Analyses for forages were undertaken on samples taken five times a week on each farm and analyses for concentrates were undertaken on a single sample taken weekly at Méjusseume and every 2 months at Les Trinottières.

Cows were milked in the morning around 07:30 and in the afternoon around 16:00. Milk yield was measured at each milking. Milk fat and protein content were measured twice weekly using 2 consecutive milkings for each measure (Milkoscan, Foss, Hillerød, Denmark). Net energy for lactation (MilkE) was calculated according to INRA (2010) as:

$$\text{MilkE} = \text{MY} \times \left[0.44 + (0.0055 \times (\text{FC} - 40)) + (0.0033 \times (\text{PC} - 31)) \right]$$

where MilkE represents the milk net energy in UFL/d, MY the milk yield in kg/d, FC the milk fat concentration in g/kg and PC the milk protein concentration in g/kg.

Body weight was measured after each morning milking using an automatic electronic scale. Body condition was scored on a scale from 0 for an emaciated cow to 5 for a fat cow with 0.25 unit increments (Bazin, 1984). Body condition score (BCS) was assessed twice monthly at Les Trinottières and monthly at Méjusseume by 3 different scorers per farm. The average BCS of the 3 scorers was used in present study. These values were then smoothed using a cubic spline, with the measurement test-days as the knots, to interpolate daily BCS. The difference between BCS of two consecutive days was defined as daily BCS loss when the difference was negative and daily BCS gain when the difference was positive.

Energy Efficiencies

Linear fixed regression using lactation average data. REI was calculated as the difference between actual and expected net energy intake on a per lactation basis. Thus, expected NEI was calculated from a single multiple linear regression model fitted to all cows simultaneously where lactation mean observed NEI was regressed on the energy expenditure traits averaged over lactation; these traits were energy for milk production, for maintenance,

and the sum over the lactation of daily body reserve loss (ΔBCS^-) and gain (ΔBCS^+) fitted separately in the model. Distinguishing body reserves loss and gain is important because gaining body reserves costs energetically more than the energy released when body reserves are mobilised, i.e. the partial efficiencies of these two processes are different (Chilliard *et al.*, 1987). To account for size differences for a given BCS loss or BCS gain change, ΔBCS^+ and ΔBCS^- were both multiplied by lactation mean BW. The multiple linear regression to estimate REI was carried out using the `lm` function in R (R Core Team, 2016) with the following model.

$$\text{NEI}_j = \mu + a \times \text{Milke}_j + b \times (\text{BW}^{0.75})_j + c \times (\text{BW}_j \times \Delta\text{BCS}^+_j) + d \times (\text{BW}_j \times \Delta\text{BCS}^-_j) + \text{REI}_j \quad (1)$$

where NEI_j is the mean NEI over the lactation for cow j ($j = 1$ to 119 cows) in UFL/d, μ is the intercept in UFL/d, Milke_j the mean Milke over the lactation for cow j in UFL/d, $(\text{BW}^{0.75})_j$ the lactation mean metabolic BW for cow j in $\text{kg}^{0.75}$, $\text{BW}_j \times \Delta\text{BCS}^+_j$ the sum of daily positive BCS change over the lactation adjusted for BW for cow j in $\text{kg} \cdot \text{unit } \Delta\text{BCS}^+$, and $\text{BW}_j \times \Delta\text{BCS}^-_j$ the sum of daily negative BCS change over the lactation adjusted for BW for cow j in $\text{kg} \cdot \text{unit } \Delta\text{BCS}^-$, REI_j is the residual for cow j in UFL/d; a , b , c , d are the model estimated coefficients.

One-step mixed model analysis using fortnightly period data. In a model, the estimated coefficient gives the efficiency of conversion of NEI into the corresponding biological trait (i.e. the partial efficiency). By definition, the individual variability in efficiency can thus be isolated using cow-specific regression coefficients on each biological trait in the model (Figure 1). The cow-specific coefficients for the biological traits were extracted from a one-step mixed model using a random intercept term and random cow effect on the coefficient of each of the biological traits in the model. To isolate this cow-specific variability in feed efficiency, the mixed model used fortnightly average measures of NEI regressed on fortnightly averages of Milke, metabolic BW, and the fortnightly sum of daily BCS change, ΔBCS . Body reserves change were no more split into gain and loss such as for model (1) because on a fortnight level, the effect of loss as fixed effect in the mixed model was not significant ($P = 0.65$). The mixed model was fitted using the PROC MIXED procedure in SAS 9.1 with a homogenous first order autoregressive structure assumed among repeated records within animal and a variance components structure for the random animal effect. The model without random effects was:

$$\text{NEI}_{ij} = \mu + a \times \text{Milke}_{ij} + b \times (\text{BW}^{0.75})_{ij} + c \times (\text{BW}_{ij} \times \Delta\text{BCS}_{ij}) + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

where μ is the intercept for the population average, a , b , c , are the population average regression coefficients respectively for: $MilkE$, $BW^{0.75}$, and $BW \times \Delta BCS$. $MilkE_{ij}$ is the $MilkE$ (UFL/d) for cow j ($j = 1$ to 119) in fortnight i ($i = 1$ to 17), $(BW^{0.75})_{ij}$ is the metabolic BW ($kg^{0.75}$) for cow j in fortnight i , $(BW_{ij} \times \Delta BCS_{ij})$ is the product between average BW in fortnight i and BCS change over fortnight i for cow j ($kg \cdot unit \Delta BCS$), and ε_{ij} the residual for cow j in fortnight i (UFL/d).

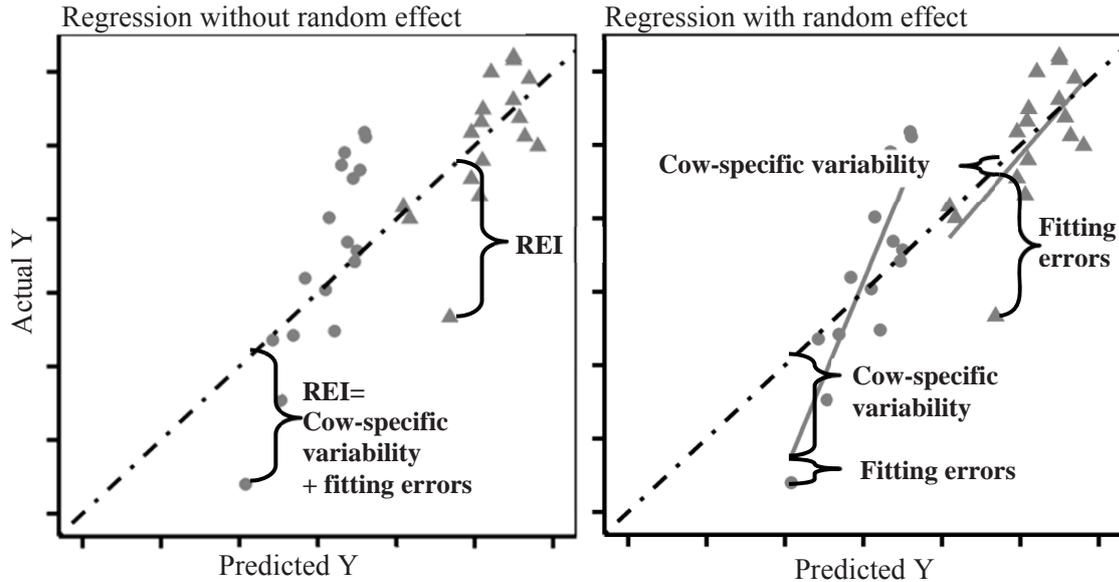


Figure 1 Decomposition of the residual energy intake (REI) for 2 dairy Holstein cows (● and ▲) having 17 measures for 2 variables X and Y , using either a linear model without a random cow effect or a mixed model with a random cow effect on the coefficient for a model predicting trait Y with one independent variable called X , with the random slope for X (—) and the population mean regression line (— . —).

The mixed model with all cow-specific regression coefficients and intercept was:

$$NEI_{ij} = \underbrace{(\mu + \mu_j) + (a + a_j) \times MilkE_{ij} + (b + b_j) \times (BW^{0.75})_{ij} + (c + c_j) \times (BW_{ij} \times \Delta BCS_{ij})}_{= \text{predicted } NEI_{ij}} + \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

Model (3) can be rearranged to partition the predicted NEI (identified above) into the part predicted using the population mean partial efficiencies, and the part predicted using the cow-specific deviation in the partial efficiencies, referred to hereafter as the cow-specific predicted NEI, as follows:

$$\begin{aligned}
 \text{NEI}_{ij} &= \underbrace{\mu + a \times \text{Milke}_{ij} + b \times (\text{BW}^{0.75})_{ij} + c \times (\text{BW}_{ij} \times \Delta\text{BCS}_{ij})}_{\text{population mean predicted component of NEI}_{ij}} \\
 &+ \underbrace{\mu_j + a_j \times \text{Milke}_{ij} + b_j \times (\text{BW}^{0.75})_{ij} + c_j \times (\text{BW}_{ij} \times \Delta\text{BCS}_{ij})}_{\text{cow-specific predicted NEI}_{ij}} + \varepsilon_{ij}
 \end{aligned}$$

where μ is the intercept for the population average, a , b , c , are the population averages for the regression coefficients of Milke , $\text{BW}^{0.75}$, $\text{BW} \times \Delta\text{BCS}$, and μ_j is the cow-specific intercept for cow j ($j = 1$ to 119). a_j , b_j , c_j , are the cow-specific coefficients for cow j ($j = 1$ to 119), respectively for: Milke (UFL/d), $\text{BW}^{0.75}$ ($\text{kg}^{0.75}$) and $\text{BW} \times \Delta\text{BCS}$ ($\text{kg} \cdot \text{unit } \Delta\text{BCS}$). The cow-specific coefficients were assumed to be independent of each other and normally distributed with a mean of 0. All possible combinations of these four cow-specific parameters were tested to better understand the contribution of each cow-specific effect. Nested models were compared based on the Bayesian Information Criterion, the SD and mean of the residuals. Only the mixed models including a maximum of two simultaneous random coefficients which were not $\Delta\text{BCS} \times \text{BW}$ converged.

To make the partial efficiencies comparable to each other, they were expressed in NEI unit, i.e. multiplied by the value of the associated variable. To isolate the part of REI which is associated with cow-specific variability, the cow-specific predicted NEI estimated with the random regressions were averaged for each cow over the 17 lactation fortnights and for each fitted random regression. These cow-specific predicted NEI were then linearly regressed on REI.

Results

The relative magnitude of variance in REI and cow-specific traits was expressed as SD/mean NEI, hereafter referred to as **CVapprox** (classical CV could not be calculated as the traits are centred on zero). Metabolic BW and NEI were the least variable of all traits, as represented by their low CV (Table 1). All traits were more variable when calculated on a fortnightly basis than on a lactation basis, especially body reserve changes which were 2.5 times more variable on a fortnightly basis. The whole lactation model explained 92% of the variation in NEI with a residual SD of 0.8 UFL/d (Table 2). This residual SD represented 3.9% of mean lactation NEI. All regression coefficients in the model were significantly different from 0 with a coefficient of 0.84 for Milke , 0.08 UFL/ $\text{kg}^{0.75}$ for metabolic BW, -0.0012 UFL/kg for $\Delta\text{BCS}^- \times \text{BW}$ and 0.0015 UFL/kg for $\Delta\text{BCS}^+ \times \text{BW}$ (Table 2).

Table 1 Mean and standard deviation of net energy intake (NEI) and energy expenditure traits, either calculated across the whole lactation (lact.) or in successive fortnightly periods (fort.) with standard deviation calculated within or between cows.

Trait	Mean		SD		
	lact.	fort.	lact.	fort. within cow	fort. between cows
NEI (UFL/d)	20.7	20.7	2.8	3.7	2.8
Energy expenditure traits					
MilkE (UFL/d)	13.7	13.7	2.4	2.7	2.4
Milk yield (kg/d)	31.4	31.4	5.2	6.0	5.2
Milk fat yield (g/d)	1 229	1 226	250	277	249
Milk protein yield (g/d)	999	997	163	183	162
ΔBCS^- ¹	1.25	0.07	0.94	0.13	0.06
ΔBCS^+ ¹	1.29	0.08	0.69	0.11	0.04
ΔBCS ¹	0.04	0.00	0.55	0.20	0.03
BCS	2.36	2.36	0.49	0.55	0.49
$\text{BW}^{0.75}$ (kg ^{0.75})	125	125	11	12	11

MilkE = net energy for lactation; BCS = Body Condition Score (scale from 0 for emaciated to 5 for fat); $\text{BW}^{0.75}$ = metabolic BW; 1 UFL = 7 115 kJ of net energy; ΔBCS^- = BCS loss; ΔBCS^+ = BCS gain; ΔBCS = BCS change; 1 unit depends on timescale used: for lactation timescale BCS change was the sum of BCS change over whole lactation and for fortnight timescale BCS change was summed over a fortnight.

Table 2 Fixed coefficients and quality of fit of the linear regression using lactation averaged variables and the random regression using fortnight averaged variables.

Model ¹	Intercept		MilkE		$\text{BW}^{0.75}$		$\text{BW}_j \times \Delta\text{BCS}^+$		$\text{BW}_j \times \Delta\text{BCS}^-$		$\text{BW}_j \times \Delta\text{BCS}$		rSD	R ²
	μ	P	a	P	b	P	c	P	d	P	c	P		
1	-1.7	ns	0.84	***	0.08	***	0.0015	***	-0.0012	***			0.8	0.92
3.4	-10.6	***	0.78	***	0.17	***					6.9×10^{-4}	***	1.8	/

$$^1 \text{ Model 1: } \text{NEI}_j = \mu + a \times \text{MilkE}_j + b \times (\text{BW}^{0.75})_j + c \times (\text{BW}_j \times \Delta\text{BCS}^+_j) + d \times (\text{BW}_j \times \Delta\text{BCS}^-_j) + \varepsilon_j$$

$$\text{Model 3.4: } \text{NEI}_{ij} = \mu + (a + a_j) \times \text{MilkE}_{ij} + b \times (\text{BW}^{0.75})_{ij} + c \times (\text{BW}_{ij} \times \Delta\text{BCS}_{ij}) + \varepsilon_{ij}$$

Where j refers to cow j (j=1-119 Holstein cows), i refers to lactation fortnight i (i = 1-17), NEI is net energy intake (UFL/d), MilkE is average net energy in milk (UFL/d), $\text{BW}^{0.75}$ is metabolic BW (kg^{0.75}), ΔBCS is the body condition score (BCS) change within a fortnight, ΔBCS^- and ΔBCS^+ are respectively the BCS loss and gain within the lactation and ε is the residual, μ is the intercept, a, b, c, d are the regression coefficients and a_j is the random cow coefficient for cow j.

1 UFL = 7 115 kJ of net energy.

Table 3 Description of the mixed model which converged: estimates of the fixed coefficients, estimates of the standard deviation (SD) of the random coefficients and standard error (Sy.x) of the estimated SD of the random coefficients.

Models ¹	Fixed coefficients						SD (Sy.x)			Residuals ²	
	μ	a	b	c	μ _j	a _j	b _j	BIC	SD	mean	
2	-7.7	0.78	0.15	6.77 10 ⁻⁴				6 385	2.0	-0.5	
3.2	-9.5	0.77	0.16	7.00 10 ⁻⁴	0.77 (0.40)			6 371	1.9	-0.5	
3.3	-9.7	0.77	0.16	7.03 10 ⁻⁴			0.006 (0.0031)	6 363	1.8	-0.5	
3.4	-10.6	0.78	0.17	6.86 10 ⁻⁴		0.06 (0.030)		6 353	1.8	-0.5	
3.5	-10.6	0.78	0.17	6.86 10 ⁻⁴	0	0.06 (0.030)		6 353	1.8	-0.5	
3.6	-9.7	0.77	0.16	7.03 10 ⁻⁴	0		0.006 (0.0031)	6 363	1.8	-0.5	
3.7	-10.6	0.78	0.17	6.87 10 ⁻⁴		0.058 (0.035)	0.002 (0.0036)	6 357	1.8	-0.5	

BIC = Bayesian Information Criterion; SE = standard error of SD.

¹ All models are derived from model 3:

$$NEI_{ij} = (\mu + \mu_j) + (a + a_j) \times MilkE_{ij} + (b + b_j) \times (BW^{0.75})_{ij} + (c + c_j) \times (BW_{ij} \times \Delta BCS_{ij}) + \varepsilon_{ij}$$

where μ is the intercept, a, b and c are the fixed coefficients, μ_j, a_j, b_j and c_j are the deviation of the intercept and the coefficients for cow j (j = 1-119 Holstein cows); and ε_{ij} is the residual for cow j and fortnight i (i = 1-17), NEI is the net energy intake (UFL/d), MilkE is the net energy in milk (UFL/d), and BW^{0.75} is the metabolic body weight (kg^{0.75}) and ΔBCS is the body condition score change within a fortnight.

² Residuals = ε_{ij}, expressed in UFL/d with 1 UFL = 7 115 kJ of net energy.

Mixed models

The mixed models had a similar mean of residuals of -0.5 UFL/d, and similar residual SD of approximately 1.8 UFL/d (Table 3). The population average partial efficiencies and especially the intercept differed according to which random component was included in the mixed model (Table 3). The population mean intercept was -7.7 UFL/d for the mixed model without cow-specific coefficients (model 2 in Table 3) and decreased by at least 2 UFL/d when a cow-specific coefficient was added to the mixed model. Across all the mixed models, the population mean partial efficiency for MilKE was about 0.78 and about $7 \cdot 10^{-4}$ UFL/kg per unit BCS for variable $\Delta\text{BCS} \times \text{BW}$ (Table 3). The population mean partial efficiency for metabolic BW was $0.15 \text{ UFL/kg}^{0.75}$ for the mixed model without any random effects (model 2 in Table 3) and increased by a maximum of $0.02 \text{ UFL/kg}^{0.75}$ when a random effect was added in the model.

Comparison of the whole-lactation linear model with the mixed models

For metabolic BW, the population mean coefficient for the mixed model was double the value of the coefficient estimated with the linear fixed effect model, whereas for $\text{BW} \times \Delta\text{BCS}$ the population mean coefficient in the mixed model was half of the coefficients in the linear fixed effect model (Table 2). The population mean of the intercept was substantially more negative in the mixed model than the intercept in the linear fixed effect model (Table 2). Residual energy intake from model (1) had a CV_{approx} of 3.9% (expressed relative to NEI), which was 1.1 times greater than the CV_{approx} of the cow-specific predicted NEI identified with the mixed model. The cow-specific predicted NEI extracted from the mixed models 3.2 to 3.7 in Table 3 explained between 52% and 59% of the variability of REI from model (1) (Figure 2).

Cow-specific variability in partial efficiencies

The cow-specific partial efficiencies are here referred to as the cow-specific coefficients expressed in NEI, i.e. multiplied by the value of the associated variable. The cow-specific intercept and the cow-specific partial efficiencies expressed in NEI had respective SD of 0.6 UFL/d for MilKE and intercept, and a SD of 0.7 UFL/d for metabolic BW when only one cow-specific coefficient or a cow-specific intercept was included in the mixed model (models 3.2 to 3.4 in Table 3). The cow-specific partial efficiencies for MilKE, for metabolic BW and the cow-specific intercepts were highly correlated with each other: the Pearson correlations were 0.89 between MilKE and metabolic BW from model 3.7 in Table 3, 1.00 between MilKE from model 3.4 and the intercept from model 3.2 in Table 3, and 0.97 for the other

correlations. Each time a cow-specific regression coefficient was added to the mixed model simultaneously with a cow-specific intercept (models 3.5 and 3.6 in Table 3), no variation remained in the cow-specific intercept term.

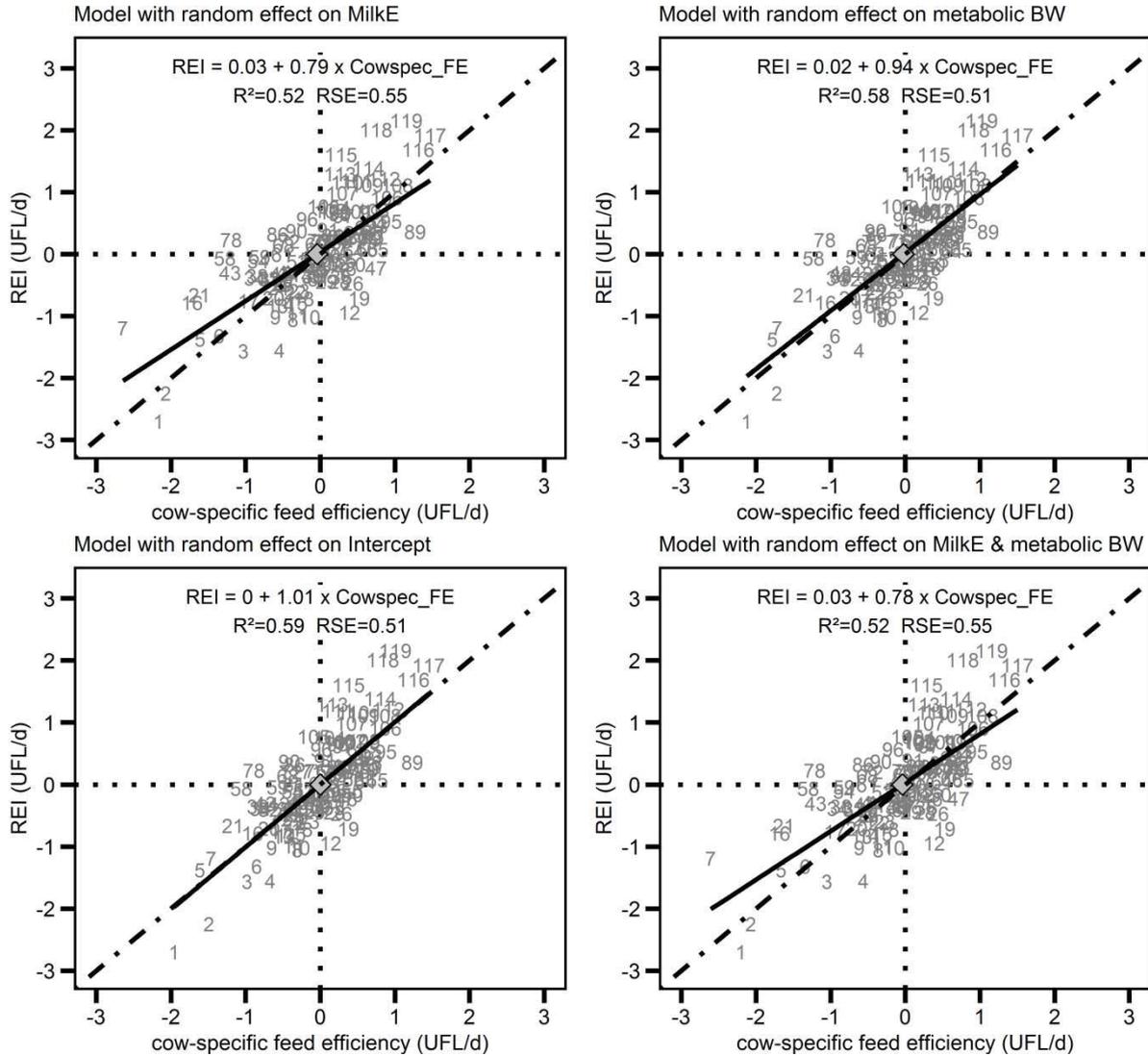


Figure 2 The relationship between mean residual energy intake (REI) estimated over the lactation with a linear fixed regression and the cow-specific predicted net energy intake (Cowspec_predNEI) estimated as lactation mean from four different mixed models characterized by different random coefficients. The regression (n = 119 Holstein cows) is indicated by the solid line with its equation, R² and rSD. The line Y=X is shown as a stippled line and the mean value by a diamond. 1 UFL = 7 115 kJ of net energy

Discussion

Irrespective of species, feed efficiency has generally been represented using the residuals of the multiple linear model regressing feed or energy intake on the phenotypes usually used to

estimate the energy expenditure of the biological functions. The regression coefficients and intercept are estimated across the entire sample population. In the present study, the objective was to isolate the cow-specific contribution to the variability in this residual intake. The strategy was to use a mixed model framework to add cow-specific regression intercept and coefficients to the standard intercept and coefficients of the biological traits in the model. This method split the predicted NEI in two parts: one calculated with the population mean intercept and mean coefficients, and one calculated with the cow-specific intercept and cow-specific coefficients. The cow-specific part of the predicted NEI was assumed to better represent the true variability in efficiency.

Cow-specific variability in feed efficiency

The cow-specific variance in feed efficiency identified in our study represented only a small part of the overall variance of NEI. Considering that the cow-specific predicted NEI in the mixed model was associated with cow-specific feed efficiency, the variance of this cow-specific NEI represented between 52% and 59% of the variance of REI from the traditionally fitted model (i.e. model 1). The remaining 41 to 48% may reflect model fitting errors or measurement errors in trait values and to a lesser extent, expenditures not included in the model. The variance of REI from model (1) represented only 8% of the variance of the measured NEI, and thus the estimated variance in cow-specific REI from model (1) only represented between 4 and 5% of the variance of actual NEI. It should be noted that these results were obtained using energy-dense diets.

The high measurement frequency and accuracy of measurement achieved in the present study was associated with a model having high R^2 and very low REI CV_{approx}. The model R^2 and CV_{approx} of REI were better than those previously reported for dairy cow RFI studies (Table 4) with R^2 between 59% for Hurley *et al.* (2016) and 85% for Xi *et al.* (2016) and CV_{approx} between 2.9% for Xi *et al.* (2016) and 13.4% for Hurley *et al.* (2016). As shown in Table 4, REI appears to be negatively correlated with phenotypic measurement accuracy and frequency. The higher the measurement frequency of the traits included in the statistical model, the lower the REI CV_{approx} and the higher the R^2 of the model (Table 4). Manafiazar *et al.* (2013) monitored the independent variables of the model once a month and had a model with R^2 of 0.68 and a RFI CV_{approx} of 7% whereas Xi *et al.* (2016) monitored some traits daily and some weekly and had the highest R^2 and lowest RFI CV_{approx} among literature studies (Table 4). Moreover, the lower the accuracy and frequency of feed intake, the lower the R^2 and the higher the RFI CV_{approx} of the model (Table 4). Thus, the variability of RFI

Table 4 Comparison of publications in dairy cows for coefficient of variation (CV approx) of residual energy intake (REI) or residual feed intake (RFI), the coefficient of determination (R²) of the model, and the measurement frequency of intake and the model traits.

References	Intake measure		Model traits measure frequency				REI or RFI CV approx (%)	Diet	R ²
	frequency	type	BW	Milk comp.	BCS				
Xi <i>et al.</i> (2016)	1/d	direct	1/w	1/w	not used		2.8	TMR	0.85
Yao <i>et al.</i> (2013)	1/d	direct	1/w	1/w	not used		6.0	TMR	0.84
Manafiazar <i>et al.</i> (2013)	1/d	direct	1/m	1/m	not used		6.9	TMR	0.68
Connor <i>et al.</i> (2013)	1/d	direct	1/f	1/w	not used		7.5	TMR	0.72
Mantysaari <i>et al.</i> (2012)	1/d	direct	1/w or 1/m	1/w – 1/m	not used		9.4	TMR	0.90
Hurley <i>et al.</i> (2016)	4.5 / lact.	indirect	1/w	1/w	1/f		13.4	pasture	0.59
<i>Current study</i>	1/d	<i>direct</i>	1/d	2/w	1/m - 1/f		3.8	TMR	0.93
<i>Current study</i>	1/d	<i>direct</i>	1/d	2/w	1/m - 1/f		3.4	TMR	na

CV approx is the CV calculated as the standard deviation of RFI or REI divided by the average feed intake.

d = day; w = week; f = fortnight; m = month; lact. = lactation; MY = milk yield; Milk comp. = milk composition in fat, protein, lactose; BCS = body condition score; na: not assessed; ni: not informed; TMR: total mixed ration.

assessed from low frequency measures of feed intake may mostly reflect measurement errors. As shown in Robinson (2005), high precision phenotyping reduces the part of REI which is due to phenotyping errors and increases the part of REI which is due to true variability in feed efficiency. Another possible explanation for having a model with higher R^2 and lower REI CV_{approx} could be a relatively low genetic variability present in both herds; genetic variation is known to exist for feed efficiency (Berry and Crowley, 2013). Because both herds have selection indexes which are in the French average of the index of the national Holstein herd, we assumed that the results were not very atypical with respect to genetic variability.

Cow-specific partial efficiencies for lactation energy output and for maintenance expenditure

The cow-specific intercept and partial efficiencies for metabolic BW and MilkE were strongly positively correlated with each other, and this regardless of the mixed model used. The positive correlations between cow-specific partial efficiencies of the main biological traits indicate that more efficient cows have higher efficiencies for both milk production and maintenance (and less efficient cows have lower efficiencies for both). This strong relationship could suggest that cow-specific efficiency differences come from processes which are not specific to the traits included in the model but affect the partial efficiencies of the traits in the same way for all traits.

Fitting a cow-specific variability in the intercept significantly improved the model fit relative to the model with no cow-specific parameters. However, adding cow-specific variability in the partial efficiencies of MilkE or metabolic BW to the model resulted in no variability in the cow-specific intercept term, implying confounding. A similar phenomenon was documented by Savietto *et al.* (2014) in growing bulls. This confounding is recurrent when the independent variables in the model are not variable enough within each cow. However the variables in the present study have similar or higher SD within cow than between cows, suggesting that too low variability within cow is not the explanation for confounding.

To affect the cow-specific partial efficiencies of the traits in the same way for all traits, the biological processes may either be upstream of all the biological functions in the model, or may be biological traits not included in the model which have a significant cow-specific component. A major process which is upstream of all traits included in the model is the digestive efficiency, the efficiency of the transformation of feed intake into metabolic energy. Indeed feed digestibility is known to vary among cows (Berry *et al.*, 2007, Mehtiö *et al.*, 2016) and is thus a likely contributor to differences in feed efficiency among cows (Potts *et*

al., 2017). Among biological traits having a cow-specific component, potential candidates could be physical activity (Connor *et al.*, 2013) or maintenance characteristics (Cannas *et al.*, 2010) which are not specific to the variability associated with metabolic BW. A useful next step, therefore, would be to record individual digestibility, methane emission, and body composition in terms of lipid and protein, as well as digestive tract size, to characterise the relationship with cow-specific partial efficiencies estimated in the present study. These phenotypes are however, not currently easily measurable on a large population, but could be recorded individually once or twice in the lactation using for example indirect methods to measure individual digestibility such as indigestible markers (Mehtiö *et al.*, 2016).

Modelling on a lactation or fortnight timescale

Model parameters estimated using biological traits calculated as lactation average were closer to literature values and had smaller residual SD than using fortnightly averages. The coefficient for metabolic BW was three times greater when using fortnight periods than the standard coefficient of $0.055 \text{ UFL/kg}^{0.75}$ published in INRA (2010). Across the 17 lactation fortnights, BW, and thus metabolic BW, does not only change because of changes in the size of the cow (e.g. due to growth) but also due to body reserve change across the lactation. The capture of body reserve change in metabolic BW variability may explain the greater coefficient for metabolic BW and smaller coefficient for body reserve change. Furthermore, the mean intercept decreased to compensate for a higher value of the coefficient on metabolic BW.

The coefficients for body reserve change obtained with the lactation average model (i.e. model 1) were comparable to standard coefficients: 214 UFL/unit BCS gain and 171 UFL/unit BCS loss in our study compared to 200 UFL/unit BCS gain and 150 UFL/BCS loss for a cow of 600 kg reported by Chilliard *et al.* (1987). When loss and gain are not distinguished, the coefficient was similar to the ones in model 1 and REI was strongly correlated to REI from model 1 ($r = 1$). This coefficient was 1.7 times greater than the equivalent coefficient in the mixed model, i.e. when using fortnight periods. This suggests that fortnight periods may not be long enough to accurately measure changes in body reserves, at least with the current methodology. Indeed the coefficient of variation of BCS change was greater on fortnight timescale than on a lactation timescale suggesting that manual BCS in the fortnight model is neither accurate enough to measure BCS changes, nor accurate enough to include cow-specific partial efficiencies on BCS changes in the mixed model. In this context, the advent of automatic measures of BCS would enable frequent, objective and accurate measures of BCS,

and could thus be a potential method to measure more accurately BCS change over a short time period (Fischer *et al.*, 2015). Moreover the model assumes that the relationship between BCS and energy deposition is linear which is not well established. Other phenotypes that do not rely on a subjective assessment, such as BW change, have been used to track changes in body reserves across lactation (Mantysaari *et al.*, 2012, Hurley *et al.*, 2016). However, there are issues with using BW change alone because in addition to the lack of information of body composition, BW change is not only due to body reserve changes but also to gut fill changes. As gut fill changes are dependent on DM intake, correction is tricky because it would use DM intake to correct BW. The model would then include an independent trait which is dependent on the dependent trait of the model. Other methods to correct gut fill have been proposed (Thorup *et al.*, 2012) but remain to be refined to account for the variability in gut fill throughout lactation. This interpretation of measurement's variability within short periods has also to be considered when analysing the correlation between the cow-specific coefficients. Indeed when period length was shortened from fortnights to weeks, the correlations between the cow-specific coefficients became weaker (data not published).

Conclusion

Feed efficiency was measured by residual energy intake in lactating dairy cows, using a linear regression of lactation average net energy intake on the lactation average of the biological traits usually used to estimate energy expenditure. A mixed model framework was subsequently used to add cow-specific regression intercept and coefficients to the standard intercept and coefficients of the biological traits in the model. Different combinations of cow-specific intercept and coefficients were compared. The cow-specific part of predicted net energy intake estimated with the mixed model was considered to better reflect true differences in feed efficiency. This cow-specific variability in feed efficiency only accounted for 4 to 5% of the variance of measured net energy intake. Using a mixed model appears to be a promising method to isolate the cow-specific component of the variability in residual energy intake. The variability of this cow-specific component estimated with the mixed model explained between 52 and 59% of the residual energy intake variability estimated with the lactation mean model.

Acknowledgements

The authors warmly thank all technical staff at the INRA Méjusseume farm and Les Trinottières (Chambre d'agriculture 49) farm who helped managing and monitoring this long-

term experimentation. This work was funded by the national project Deffilait (ANR-15-CE20-0014) and APIS-GENE.

References

- Aggrey SIE and Rekaya R 2013. Dissection of Koch's residual feed intake: implications for selection. *Poultry Science* 92, 2600-2605.
- Bazin S 1984. Grille de notation de l'état d'engraissement des vaches Pie Noires. L'Institut Technique de l'Elevage Bovin, Paris, France.
- Berry DP and Crowley JJ 2013. Cell Biology Symposium: genetics of feed efficiency in dairy and beef cattle. *Journal of Animal Science* 91, 1594-1613.
- Berry DP, Horan B, O'Donovan M, Buckley F, Kennedy E, McEvoy M and Dillon P 2007. Genetics of grass dry matter intake, energy balance, and digestibility in grazing Irish dairy cows. *Journal of Dairy Science* 90, 4835-4845.
- Cannas A, Atzori AS, Teixeira IAMA, Sainz RD and Oltjen JW 2010. The energetic cost of maintenance in ruminants: from classical to new concepts and prediction systems. In *Energy and protein metabolism and nutrition* (ed. Crovetto GM), pp. 531-542. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
- Chilliard Y, Rémond B, Agabriel J, Robelin J and Verite R 1987. Variations du contenu digestif et des réserves corporelles au cours du cycle gestation-lactation. *Bulletin Technique Centre de Recherches Zootechniques et Vétérinaires de Theix* 70, 117-131.
- Connor EE, Hutchison JL, Norman HD, Olson KM, Van Tassell CP, Leith JM and Baldwin RL 2013. Use of residual feed intake in Holsteins during early lactation shows potential to improve feed efficiency through genetic selection. *Journal of Animal Science* 91, 3978-3988.
- Dekkers JC and Gilbert H 2010. Genetic and biological aspect of residual feed intake in pigs. In *Proceedings of the 9th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production*, 1-6 August 2010, Leipzig, Germany, pp. 1-8.
- Fischer A, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2015. Rear shape in 3 dimensions summarized by principal component analysis is a good predictor of body condition score in Holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science* 98, 4465-4476.
- Hurley AM, López-Villalobos N, McParland S, Kennedy E, Lewis E, O'Donovan M, Burke JL and Berry DP 2016. Inter-relationships among alternative definitions of feed efficiency in grazing lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 99, 468-479.

- Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) 2010. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - valeurs des aliments : tables Inra 2007 mise à jour 2010. Editions Quae, Versailles, France.
- Manafiazar G, McFadden T, Goonewardene L, Okine E, Basarab J, Li P and Wang Z 2013. Prediction of residual feed intake for first-lactation dairy cows using orthogonal polynomial random regression. *Journal of Dairy Science* 96, 7991-8001.
- Mantysaari P, Liinamo AE and Mantysaari EA 2012. Energy efficiency and its relationship with milk, body, and intake traits and energy status among primiparous Nordic Red dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 95, 3200-3211.
- Mehtiö T, Rinne M, Nyholm L, Mäntysaari P, Sairanen A, Mäntysaari EA, Pitkänen T and Lidauer MH 2016. Cow-specific diet digestibility predictions based on near-infrared reflectance spectroscopy scans of faecal samples. *Journal of Animal Breeding and Genetics* 133, 115-125.
- Mehtiö T, Negussie E, Mäntysaari P, Mäntysaari EA and Lidauer MH 2016. Partitioning genetic variance of metabolizable energy efficiency in dairy cows. In 67th Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), 29 August–2 September 2016, Belfast, United Kingdom, pp. 453.
- Potts SB, Boerman JP, Lock AL, Allen MS and VandeHaar MJ 2017. Relationship between residual feed intake and digestibility for lactating Holstein cows fed high and low starch diets. *Journal of Dairy Science* 100, 265-278.
- R Core Team 2016. R: A language and environment for statistical computing. In R foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Robinson DL 2005. Assessing the accuracy of modelling weight gain of cattle using feed efficiency data. *Livestock Production Science* 95, 187-200.
- Saviotto D, Berry DP and Friggens NC 2014. Towards an improved estimation of the biological components of residual feed intake in growing cattle¹. *Journal of Animal Science* 92, 467-476.
- Thorup VM, Edwards D and Friggens NC 2012. On-farm estimation of energy balance in dairy cows using only frequent body weight measurements and body condition score. *Journal of Dairy Science* 95, 1784-1793.
- Vallimont JE, Dechow CD, Daubert JM, Dekleva MW, Blum JW, Barlieb CM, Liu W, Varga GA, Heinrichs AJ and Baumrucker CR 2011. Short communication: Heritability of gross feed efficiency and associations with yield, intake, residual intake, body weight,

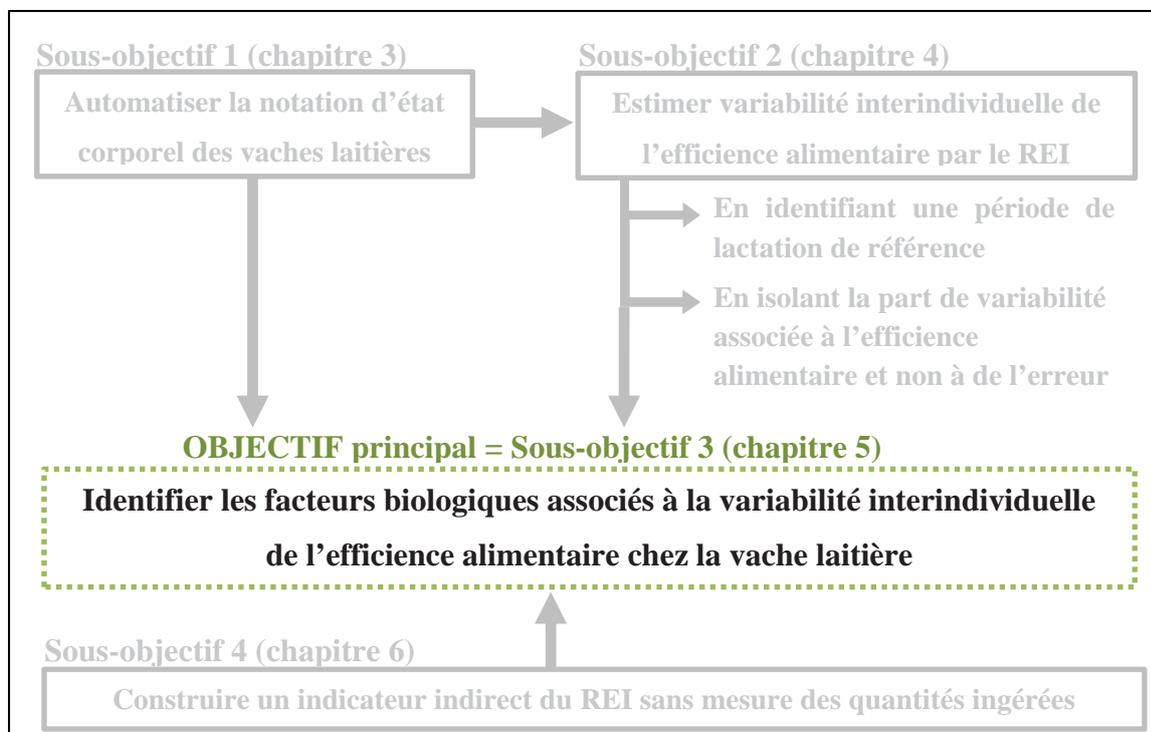
and body condition score in 11 commercial Pennsylvania tie stalls. *Journal of Dairy Science* 94, 2108-2113.

Xi YM, Wu F, Zhao DQ, Yang Z, Li L, Han ZY and Wang GL 2016. Biological mechanisms related to differences in residual feed intake in dairy cows. *Animal* 10, 1311-1318.

Yao C, Spurlock DM, Armentano LE, Page CD, VandeHaar MJ, Bickhart DM and Weigel KA 2013. Random Forests approach for identifying additive and epistatic single nucleotide polymorphisms associated with residual feed intake in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 96, 6716-6729.

Chapitre 5

Identification des mécanismes biologiques associés aux différences interindividuelles d'efficacité alimentaire chez la vache laitière



La méthodologie proposée autour du residual energy intake dans les deux chapitres précédents a permis de mieux identifier la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire dans la variabilité du residual energy intake.

Cette méthodologie a en partie été appliquée dans ce chapitre pour identifier les mécanismes biologiques associés aux différences interindividuelles d'efficacité alimentaire chez la vache laitière.

Pour réduire la composante du residual energy intake qui est liée à des erreurs de mesure, l'ensemble des caractères a été mesuré avec la fréquence la plus importante permise par le dispositif expérimental et sur toute la lactation pour l'ensemble des vaches. De plus, pour avoir une estimation non biaisée de l'efficacité alimentaire, le residual energy intake a été estimé à partir des variables moyennées sur la lactation.

Ce chapitre présente à la fois le dispositif expérimental mis en place pour répondre à cette question, c'est-à-dire l'ensemble des phénotypes mesurés pour chaque vache et leur fréquence, ainsi que les mécanismes biologiques identifiés comme associés à la variabilité du residual energy intake.

Identification of biological traits associated with differences in residual energy intake between lactating Holstein cows¹

Identification des facteurs biologiques associés aux différences interindividuelles d'énergie nette ingérée résiduelle chez la vache Holstein en lactation

A. Fischer, R. Delagarde and P. Faverdin

Original Research Article – Under review at Journal of Dairy Science

Résumé

Le residual energy intake, couramment utilisé pour estimer la variation interindividuelle de l'efficacité alimentaire, nécessite des mesures fréquentes et précises des quantités ingérées individuelles. Le développement d'un schéma de sélection est donc compliqué, surtout parce que les quantités ingérées ne sont pas accessibles pour de grandes populations. Une alternative est plutôt de se focaliser sur les déterminants biologiques de l'efficacité alimentaire, qui potentiellement sont mesurables directement en ferme à haut débit. Différents mécanismes ont été identifiés dans la bibliographie comme potentiellement associés à aux différences interindividuelles d'efficacité alimentaire chez la vache laitière.

L'objectif de ce travail a été d'identifier quels sont les mécanismes biologiques associés aux différences d'énergie nette ingérée résiduelle (**REI**) chez la vache laitière. Plusieurs phénotypes candidats ont été mesurés fréquemment et simultanément pendant les 238 premiers jours de lactation pour 60 vaches Holstein alimentées avec une ration complète à base d'ensilage de maïs. Le REI a été calculé comme le résidu d'une régression linéaire multiple de l'énergie nette ingérée moyennée sur la lactation, en fonction de la perte et du gain de note d'état corporel cumulé sur la lactation et de la moyenne sur la lactation du poids vif métabolique et de l'énergie nette du lait. Une régression par les moindres carrés partiels (**PLSr**) a été ajustée sur l'ensemble des caractères mesurés pour expliquer la variabilité du REI.

¹ Ce chapitre est présenté selon les recommandations de Journal of Dairy Science et a été soumis le 18/01/2017 et en relecture depuis le 24/01/2017. Le résumé est une traduction du résumé de l'article soumis.

Une partie des résultats de ce chapitre a aussi fait l'objet d'une communication orale :

Fischer A, Delagarde R and Faverdin P 2016. Ability to digest explains part of the between cow feed efficiency variability. In 67th Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), Belfast, United Kingdom, p. 549.

La régression linéaire estimant le REI expliquait 93,6% de la variation phénotypique de l'énergie nette ingérée, avec 65,5% associés aux besoins de lactation, 23,2% à l'entretien, 4,9% à la variation des réserves corporelles, et les 6,4% résiduels représentaient le REI. L'ensemble des caractères mesurés expliquait 58,9% de la variation phénotypique du REI, majoritairement expliqués par l'activité physique (26,5%) et le comportement alimentaire (21,3%). Cependant l'importance de ces contributions dépendait des variables incluses dans la PLSr. En effet, une part similaire de variabilité du REI était expliquée par la variation de la température du rumen, la variation des réserves corporelles et la digestibilité, quand tous les caractères associés au comportement et à l'activité étaient exclus de la PLSr. Cette confusion apparente entre les caractères ne permet pas de conclure sur la base biologique des différences d'efficacité alimentaire. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour pouvoir caractériser le lien de causalité entre l'efficacité alimentaire et le comportement alimentaire, la digestibilité, les variations de réserves corporelles, l'activité et la température ruminale.

Interpretive Summary

Achieving higher feed efficiency in dairy cows is seen to contribute to increasing animal production whilst maintaining or reducing amount of resources used, to cope with increasing demand in animal products. Measuring feed efficiency is not feasible broadband, especially because it requires feed intake measurements which are only available in some research facilities. Results suggest that the main differences in feed efficiency among dairy cows may involve digestion, activity and body reserves change mechanisms. Developing a selection program based on these traits is an alternative to improve feed efficiency in dairy cows.

Identification of biological traits associated with differences in residual energy intake between lactating Holstein cows

A. Fischer*†, R. Delagarde† and P. Faverdin†

*Institut de l'élevage, F-75595, Paris, France

†PEGASE, Agrocampus-Ouest, INRA, F-35590, Saint-Gilles, France

Corresponding author:

Philippe Faverdin

INRA UMR PEGASE

Domaine de la Prise

F-35590 Saint-Gilles

France

+33(0)2.23.48.50.95

philippe.faverdin@inra.fr

Abstract

Residual feed intake, which is usually used to estimate individual variation of feed efficiency, requires frequent and accurate measurements of individual feed intake to be carried out. Developing a breeding scheme based on residual feed intake in dairy cows is therefore complicated, especially because feed intake is not measurable for a large population. Another solution could be to focus on biological determinants of feed efficiency which could potentially be directly and broadband measurable on farm. Several phenotypes have been identified in literature as being associated with differences in feed efficiency. The present study therefore aims to identify which biological mechanisms are associated with residual energy intake (**REI**) differences among dairy cows. Several candidate phenotypes were

recorded frequently and simultaneously throughout the first 238 days in milk for 60 Holstein cows fed on a constant diet based on maize silage. A multiple linear regression of the lactation average of net energy intake was fitted on lactation averages for milk energy output, metabolic BW, lactation sum of both, body condition score loss and gain and the residuals were defined as REI. A partial least square regression (**PLSr**) was fitted over all traits to explain REI variability. Linear multiple regression explained 93.6% of net energy intake phenotypic variation, with 65.5 % associated with lactation requirement, 23.2 % to maintenance, 4.9 % to body reserves change whilst the 6.4% residuals represented REI. Overall measured traits contributed to 58.9% of REI phenotypic variability which were mainly explained by activity (26.5 %) and feeding behavior (21.3 %). However, the level of contribution of each trait was dependent on the variables included in PLSr because REI variability was comparably by rumen temperature variation, body reserves change and digestibility when all traits associated with activity and behavior were excluded from PLSr. Drawing a conclusion on biological traits which explain feed efficiency differences among dairy cows was not possible due to this apparent confusion between traits. Further investigation is needed to characterize the causal relationship of feed efficiency with feeding behavior, digestibility, body reserves change, activity and rumen temperature.

Key words: feed efficiency, dairy cow, phenotype

Introduction

World population is expected to increase by 32 % by 2050 compared to 2015 (United Nations, 2015). Demand for animal products is therefore expected to increase (IAASTD, 2009). To increase animal production, a possible solution is to improve feed efficiency by selection, which means increased animal production or decreased use of resources. Selection for feed efficiency is complicated because individual variability of feed efficiency is not easily measurable on a large population. The classic indicator of individual variability in feed efficiency is residual feed or energy intake (RFI or REI; Dekkers and Gilbert, 2010; Aggrey and Rekaya, 2013; Berry and Crowley, 2013). By definition, RFI is the residual of a linear regression of feed intake fitted over a population, on the biological traits associated with the main energy expenditures. Because DM intake is difficult and expensive to measure on a large population, especially in cattle, phenotyping for RFI is difficult for a large population. Developing EBV based on RFI is limited. Furthermore, RFI heritability seems too moderate to build a robust selection index based on RFI. Recorded RFI heritability varies greatly in

literature: from 0.07 to 0.62 in beef cattle (Berry and Crowley, 2013), from 0 to 0.32 in lactating dairy cows (Berry and Crowley, 2013), and from 0.10 to 0.60 in finisher pigs (Knap and Wang, 2012). However, Young and Dekkers (2012) showed that selecting for diverging RFI was possible in pigs: DMI was reduced and performance was only slightly decreased. In dairy cows, RFI measurement is more complicated than in growing animals because the production cycle is long and RFI needs more variables to be measured. To avoid measuring RFI in lactating cows, Macdonald *et al.* (2014) assumed that cows identified as efficient and inefficient as calves would maintain their efficiency as lactating cows. DMI differences between both efficiency groups were significant. However if both groups had been built with RFI as cows and not as calves, their results suggest that the groups would not have had the same cows.

The major problem with RFI is that by definition of model residuals, RFI does not only reflect individual variability in feed efficiency but also model fitting and measurement errors (Robinson, 2005). To have a better indication of feed efficiency variability, the possibilities are either to isolate RFI variability which is specific to animals and not to errors, or to sum up feed efficiency in its main biological determinants. Literature is poorly documented in methods helping at identifying animal-specific variability of RFI. Using frequent and accurate measurements of both DMI and energy expenditure traits should reduce part of RFI associated with measurement errors (Robinson, 2005) and render RFI more representative of feed efficiency variability. Characterizing feed efficiency with its main biological determinants is an alternative to DMI modelling which could help to identify more heritable traits. Identification of feed efficiency biological determinants is largely documented in literature. Only Richardson and Herd (2004) have simultaneously analyzed the main traits expected to be involved in feed efficiency variability in beef cattle. In dairy cows, most studies have focused only on a group of these traits at the same time (Table 1). A more complete study with simultaneous measures of the identified traits is required to reach a conclusion on the biological determinants of RFI variability in dairy cows.

The present study aimed at simultaneously and individually measuring most potential determinants of feed efficiency cited in literature to estimate the contribution of each trait to residual energy intake phenotypic variability in lactating dairy cows (Table 1). To reduce part of REI variability which can be associated with measurement errors, REI was measured with accurate and frequent measurements of DMI and of the traits associated with the main energy expenditures.

Table 1 Review of biological traits recorded to explain residual feed intake variability.

References	Milk ¹	body comp. & change ²	Digestion ³	thermo-regulation	morphology	Behavior	activity	genes CNV study ⁴
Coleman <i>et al.</i> , 2010	MY, MS	BCS			BW			
Hou <i>et al.</i> , 2012								x
Mantysaari <i>et al.</i> , 2012	ECMY, MS	BCS, BCS change, NEFA			BW			
Connor <i>et al.</i> , 2013	ECMY				BW	Feeding	pedometer	
DiGiacomo <i>et al.</i> , 2014				rectal & skin temperature				
Thornhill <i>et al.</i> , 2014	MY, MS, lactose		DMd, rumen metabolite					
Manafiazar <i>et al.</i> , 2015	ECMY	BCS			BW, conformation traits			
Xi <i>et al.</i> , 2015								x
Xi <i>et al.</i> , 2016	MY, FCM, MS, lactose, urea				BW, chest girth	Feeding		
Present Study	MY, MS, lactose	BCS, BCS change, NEFA, glucose, urea	DMd	Rumen temperature	BW	Feeding, Ruminating	Overactivity, standing	

¹MY = milk yield; MS = milk solids; ECMY = energy corrected milk yield.

²Body comp. = body composition traits; NEFA = non-esterified fatty acid.

³DMd = DM digestibility.

⁴CNV = copy number variation.

Materials and methods

An experiment on lactating dairy cows was established to frequently record as many phenotypes as possible among those which are potentially determinant of feed efficiency. Experimentation was carried out indoors to minimize the effect of changes in environmental conditions. This experiment was carried out from August 2014 to June 2015 in the INRA UMR PEGASE Méjusseaume (Le Rheu, France) experimental farm in Western France. Dataset consisted of 60 Holstein cows with 50 % primiparous among them and housed in a free tie-stall barn. Data were available from calving to 238 days in milk for all cows. Calving was seasonal with a calving season length of 56 days between August the 27th and October the 22nd 2014.

A same TMR was fed from calving to end of lactation. The diet was offered ad libitum with a daily target level of 10 % refusals per cow. Diet energy and protein densities were assessed according to the French system (INRA, 2010: UFL are amounts of net energy (**NE**) for lactation with 1 UFL equating to 7.1 MJ of net energy for lactation, and PDIE are amounts of metabolizable protein). The TMR was based on 647g/kg DM maize silage, 135 g/kg DM energy concentrate, 105 g/kg DM soybean cake, 100 g/kg DM dehydrated alfalfa and 13 g/kg DM minerals. This diet had a net energy density of 0.94 UFL/kg DM (6.7 MJ of NE/kg DM) and a metabolizable protein concentration of 94.3 g of PDIE/kg DM.

Feed efficiency

Measurements to calculate feed efficiency. Each cow had its own individual feed trough. To enable feed distribution, access to the feed trough was closed from 07:30 to 09:00 and from 14:00 to 16:00. Conversely, all cows were locked at the feed fence from 09:00 to 10:00 and in the afternoon after milking, starting at 15:30 until 18:00. Feed intake was measured daily for each cow as was the difference between distributed and next morning refusals weight. A bulk sample of each ingredient was analyzed for composition. Analyzes for DM were based on samples taken 5 times weekly for wet forages and once weekly for concentrates. Cows were gathered for milking around 06:30 and 15:30 and were waiting in a standing position for milking. Milk yield was recorded at each milking. Twice a week, two consecutive milkings were analyzed for milk protein and fat concentrations. Net energy for lactation was estimated according to the French standard energy requirement equation (INRA, 2010):

$$NE_L = 7.12 \times \left[MY \times \left(0.44 + 0.0055 \times (MFC - 40) + (0.0033 \times (MPC - 31)) \right) \right] \quad (1)$$

where NE_L represented net energy for lactation in MJ of NE/d, MY the milk yield in kg/d, MFC the milk fat concentration in g/kg, MPC the milk protein concentration in g/kg.

Body weight was measured after each morning milking using an automatic electronic scale. Body condition was scored on a scale from 0 for an emaciated cow to 5 for a fat cow with 0.25 unit increments Bazin (1984). Body condition score was assessed monthly with 3 different authorized scorers. Average BCS of the 3 scorers was used. These values were then smoothed using a cubic spline using measuring days as the knots to interpolate daily BCS. The difference between BCS of two consecutive days was defined as daily BCS loss when the difference was negative and daily BCS gain when the difference was positive.

Calculation of feed efficiency. Feed efficiency variability was calculated using REI over near whole lactation period, i.e. first 238 days in milk, using variables either averaged or summed over this period. A linear multiple regression regressed lactation average of net energy intake (**NEI**) on the main energy expenditure traits: lactation averaged NE_L , lactation averaged metabolic BW, lactation body reserves loss and gain. Body reserves loss was estimated with the lactation sum of daily BCS loss multiplied by the lactation averaged BW and conversely body reserves gain was defined as the lactation sum of daily BCS gain multiplied by lactation averaged BW. This multiplication by BW was to correct BCS change for body size differences between cows which may exist for a given BCS change. Body reserves change was split in loss and gain because gaining body reserves expends more than the energy supply associated with the corresponding loss of body reserves (Chilliard *et al.*, 1987). REI was expressed in the French energy system INRA (2010), UFL, and converted into MJ unit of net energy and calculated as residuals of following model using the lm function in R Core Team (2013):

$$NEI = \mu + a \times NE_L + b \times (BW^{0.75}) + c \times (BW \times \Delta BCS^+) + d \times (BW \times \Delta BCS^-) + REI \quad (2)$$

where NEI represented net energy intake in MJ of NE/d, μ the intercept, NE_L the net energy for lactation in MJ of NE/d, ΔBCS^+ the lactation gain of body condition score, ΔBCS^- the lactation loss of body condition score, REI the residuals and a, b, c, d the regression coefficients.

A final objective was to create efficiency groups of cows to compare them for the recorded traits. Instead of identifying extremes using standard deviation, as often done in literature, the most and the least efficient cows were identified using the 20 % extreme: the 10 % most efficient were the 6 cows which had the lowest REI and the 10 % least efficient were the 6 cows which had the highest REI. The remaining 80 % were considered as “medium group”.

These three groups were compared for all measured phenotypes using an analysis of variance performed with Anova function of package car in R Core Team (2013).

Biological traits Measured as potential Determinants of Residual energy intake

The recorded characters were divided into 8 biological traits: milk yield expenditure, maintenance, digestibility, body reserves change, rumen temperature, feeding behavior, non-identified behavior and physical activity. Phenotypes measured within each of these eight traits are described below.

Milk yield Expenditure. Lactation expenditure was described by 2 variables: lactation energy outputs, defined as NE_L (model 1 above), and milk lactose concentration. Lactose was measured for one milking each week and was averaged per cow over the lactation period.

Maintenance. Maintenance expenditure was approached using 2 variables referring to body size and body composition to assess possible differences in maintenance cost of lean and fat mass: lactation average metabolic BW and lactation average BCS.

Digestibility. Digestibility was measured for two consecutive 14-day periods during the second half of lactation with a minimum of 150 DIM. Average digestibility calculated across both periods was used as proxy of apparent DM digestibility. To measure DM digestibility, the gold standard needs the measurement of DM excreted in feces which requires total and individual feces collection over several days. Using this gold standard was therefore not adapted for a large population. An indirect method usually used to estimate DM intake for grazing cows (Delagarde *et al.*, 2010) was thus used to estimate DM fecal output. An indigestible marker, ytterbium ($YbCl_3$), was dosed to each cow twice a day in cellulosic stoppers: one in the morning and one in the afternoon over 14 consecutive days. Feces were collected by rectal sampling from each cow before meals, one in the morning and one in the afternoon during the 5 last days of the 14-day drugging period. A representative sample of the 10 fecal samples was taken for each cow. Ytterbium concentration was measured for each representative sample. Excreted DM in feces for each cow was calculated as follows:

$$DM_{feces_i} = \frac{Yb_i}{[Yb]_i}$$

where DM_{feces_i} represented excreted amount of daily DM for cow i ($i = 1 - 60$ cows), $[Yb]_i$ was ytterbium concentration in the representative sample of feces for cow i in mg/g and Yb_i was daily amount of dosed ytterbium for cow i in mg/d.

Body Reserves change. Body reserves change was described by lactation BCS loss and BCS gain multiplied by lactation average BW, and was also described by glucose and

non-esterified fatty acid (NEFA) concentration in blood. From calving until end of lactation, caudal blood samples were collected 1 month after calving and then monthly using physiological stages to measure glucose and NEFA concentrations. Glucose and NEFA concentrations were averaged for each cow over lactation. Assuming that the way a cow mobilizes or accretes body reserves throughout lactation could affect NEI use, the number of inflexion points in BCS kinetic throughout lactation was calculated. In the end, body reserves change gathered 5 variables.

Rumen Temperature. Each cow had a San'Phone® which is a reticulo-rumen thermobolus (Medria, Châteaubourg, France, Timsit *et al.*, 2011) during the entire lactation period. This thermobolus recorded rumen temperature every 5 minutes. Data outputs gathered two distinct temperatures: raw temperature and a drink-corrected temperature (Figure 1). Raw temperature falls each time the cow drinks water. Drink-corrected temperature was the raw temperature corrected for these drinking effects, such that corrected temperature reflected body core temperature. For both temperatures, the lactation average was calculated for each cow, resulting in two variables: one for the corrected temperature and one for the raw temperature. In the same way, the standard deviation of the daily rumen temperature was calculated for both temperatures to reflect the daily variation of the rumen temperature. In the end, rumen temperature trait gathered 4 variables.

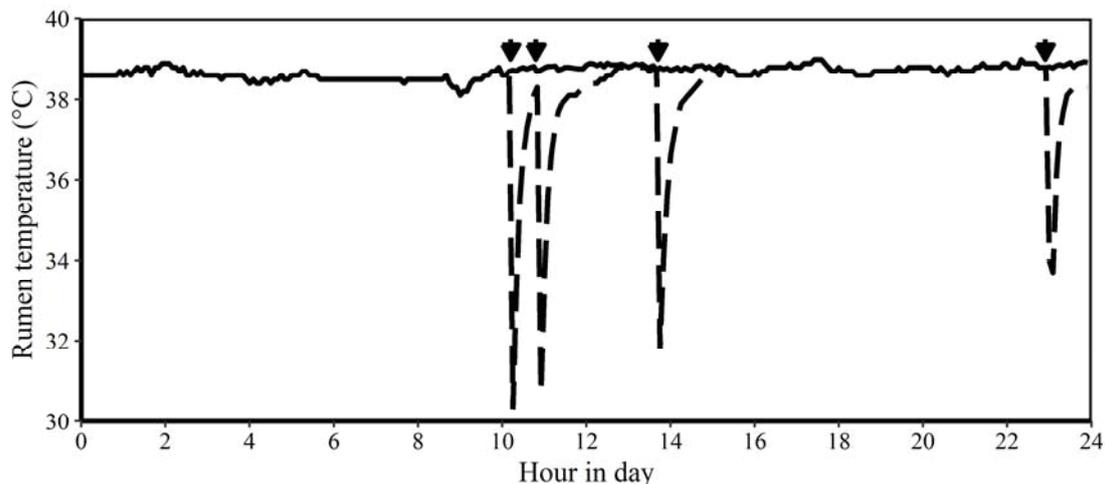


Figure 1 Daily kinetic taken from a lactating dairy cow for a given day of raw rumen temperature (— —) and of drinking corrected rumen temperature (——). Each drinking begins at fall of raw rumen temperature (▼).

Activity, Feeding Behavior and non-identified Activity. Each cow was equipped with the Medria Axel® logger (Medria, Châteaubourg, France) which is an activity logger placed on the collar. This logger was validated for eating and ruminating behavior on a collective feed trough using a diet similar to the one used in the present study (Delagarde and Lemonnier, 2015). This logger records standing or lying activity and five different behaviors: eating, ruminating, resting, overactivity and non-identified activity. Non-identified activity refers to all activities which are not eating, ruminating, resting or overactivity. Every five minutes the logger attributed these 5 minutes to the most dominant behavior out of the 5 recorded, and also attributed these 5 minutes to the dominant position between standing and lying. For each behavior and for standing, the time spent daily was summed per day per cow and then averaged per cow over the lactation. Additionally to detect possible pattern differences for a given behavior between efficiency groups, for each of the daily 24 hours, the hourly time spent on each behavior and on standing was calculated and averaged per cow over the lactation. Additional information collected by the logger was the average intensity of non-identified activity and of overactivity every 5 minutes. This intensity was scored between 0 for a null activity and 10 for a high activity with 1 unit increments. Both of these intensity variables were also averaged per cow over the lactation.

In the end, the feeding behavior trait gathered 50 variables, comprising all variables related to eating and ruminating behaviors; the activity trait gathered 76 variables, comprising all variables related to physical activity: standing, resting and overactivity; and the non-identified activity trait gathered 26 variables, comprising all variables related to the behavior “non-identified activity”.

Calculating determinant Contribution to Residual energy intake and to Net energy intake

To identify the most relevant variables to explain REI, a linear regression of REI was fitted on the previously described variables. A Partial Least Square Regression (**PLSr**) was preferred in this case as opposed to a classic linear regression because PLSr is more effective and particularly relevant to fit linear regression for numerous and potentially correlated independent variables (Wold *et al.*, 1984; Höskuldsson, 1988), such as in the present study. Indeed PLSr builds new orthogonal variables, called latent variables, from the original variables. This way PLSr reduces the number of independent variables. Then an ordinary linear least squares regression is fitted on these latent variables. The PLSr was fitted using the function `pls` of package `pls` in R Core Team (2013). All potential variables, including the four used in model (2) to estimate REI, were included in PLSr. To identify the traits which were

the most relevant to explain REI variability, the variable selection procedure proposed by Lê Cao *et al.* (2011) for PLSr was used to select the most stable variables. This methodology is developed in three steps: firstly, by selecting the number of latent variables, then by estimating the stability of the original variables and finally by selecting which of these original variables are to be kept in PLSr. The number of latent variables is defined as the number of latent variables minimizing the Root Mean Square Error of Prediction (**RMSEP**). This error of prediction was defined as the average RMSEP from 30 cross-validations: each calibration was carried out on 50 different cows, and validated on the 10 remaining cows (these 10 cows are different at each cross-validation). In the present study, RMSEP was minimal with 4 latent variables (Figure 2A). The stability of original variables used to explain REI variability was estimated using 2,500 PLSr, with each fitted on a permutation of REI values. The original variables were then added to PLSr one at a time according to their stability order. In the end we kept 27 original variables because this number minimized the cross-validation RMSEP (Figure 2B).

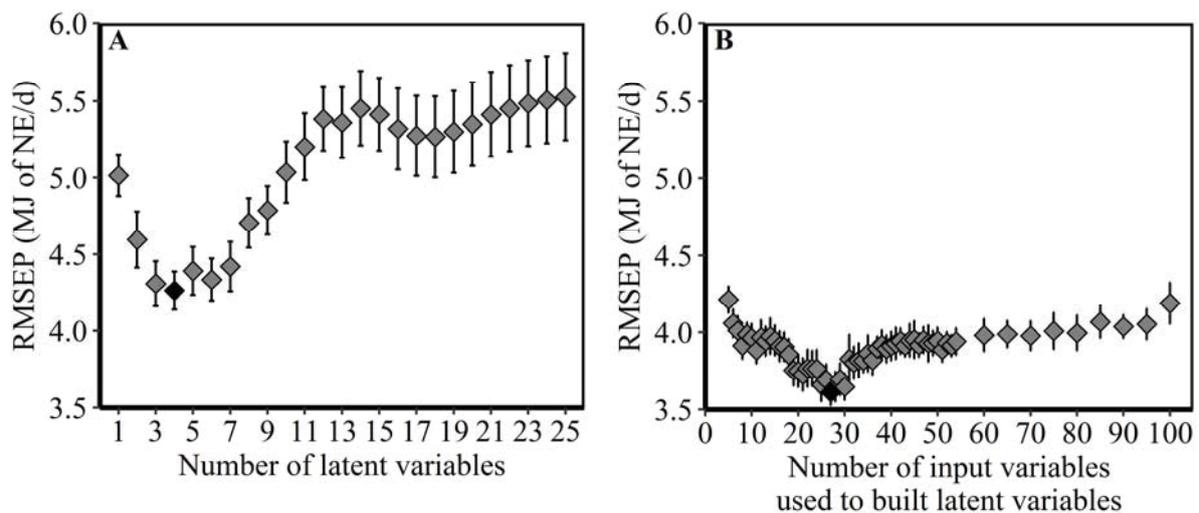


Figure 2 Evolution of the root mean squared error of prediction (RMSEP) (A) according to the number of latent variables kept in the partial least square regression (PLSr) and (B) after selecting the right number of latent variables, according to the number of input variables kept in the PLSr to build the latent variables. The black diamond is for the minimum RMSEP on both graphs, for a population gathering 60 lactating dairy cows. NE is for net energy.

The estimation of the contribution of each of the eight biological traits to NEI variability was made in 2 steps: one to estimate the contribution to NEI variability of each of the four traits included in model (2) and one to estimate the contribution to REI variability of each of the

eight traits defined in previous section. The contribution of a given trait to NEI or REI variability was calculated as the part of NEI or REI variability which was explained by the variability of this given trait in the model. By definition, the contribution of a given trait to NEI or REI variability was calculated as the sum of the variance of this trait and of each of the covariance of this trait with the seven other traits. For example contribution of maintenance trait to REI variability was calculated as follows and expressed as a percentage:

$$\text{contrib}_{\text{Maint}} = \text{contrib} \left(a \times \text{BW}^{0.75} + b \times \text{BCS} \right) \\ = \left(\frac{\text{var} \left(a \times \text{BW}^{0.75} + b \times \text{BCS} \right)}{\text{var}(\text{REI})} + \frac{\sum_{i=1}^7 \text{cov} \left(a \times \text{BW}^{0.75} + b \times \text{BCS}, \text{Trait}_i \right)}{\text{var}(\text{REI})} \right) \times 100$$

where $\text{contrib}_{\text{Maint}}$ represented maintenance contribution to REI variability, a and b the slopes for the variables $\text{BW}^{0.75}$ and BCS in the PLSr, var the variance, cov the covariance and Trait_i trait i ($i = 1 - 7$ other traits in the model).

Results and discussion

Multi-traits Contribution to Residual energy intake variability

Model used to estimate REI explained NEI variability with a coefficient of determination of 93.6 % and a residual standard error of 4.6 MJ of NE/d (Figure 3). The PLSr model used to explain the 6.4 % residual variance of NEI, i.e. REI, explained 58.9 % of the observed variation of REI with a RMSEP of 3.6 MJ of NE/d (Figure 4). In a similar approach in beef steers, Richardson and Herd (2004) achieved to explain 52 % of RFI variability when using a multi-traits model in beef steers. Moreover they estimated that the traits which they could not include in the model such as activity, feeding patterns and heat increment of fermentation accounted for additional 21 % RFI variability. Because species are different in both studies, the results are not comparable.

The 58.9 % of REI variability were explained by the 27 variables selected by the procedure (Table 2 and Figure 5) which gathered six biological traits: activity accounted for 26.5 %, feeding behavior for 21.3 %, other behavior for 10.6 % and overall body reserves change, rumen temperature and digestibility for 0.5 % of REI variability (Figure 3). However these contributions were slightly different when all variables associated with behavior and activity were excluded from PLSr. PLSr explained 51.3 % of REI variability with 27.8 % for rumen temperature, 20.7 % for body reserves change and 2.8 % for digestibility. These results highlighted apparent confused effects between the measured traits. In beef steers Richardson and Herd (2004) also found that activity, feeding behavior and digestibility explained part of

RFI variability: 10 % for activity, 10 % for digestibility and 2 % for feeding patterns. The remaining explained part in their study was explained by protein turnover and metabolism for 37.7 %, heating fermentation for 9 % and body composition for 5 %. However as suggested by Richardson and Herd (2004) regarding their results, which is also valid for present study, a major limit of the estimated contribution is the use of indirect and sometimes not accurate enough methods to estimate each determinants variability.

Contribution of each measured trait will be discussed in following sections, as well as their interaction with other measured trait.

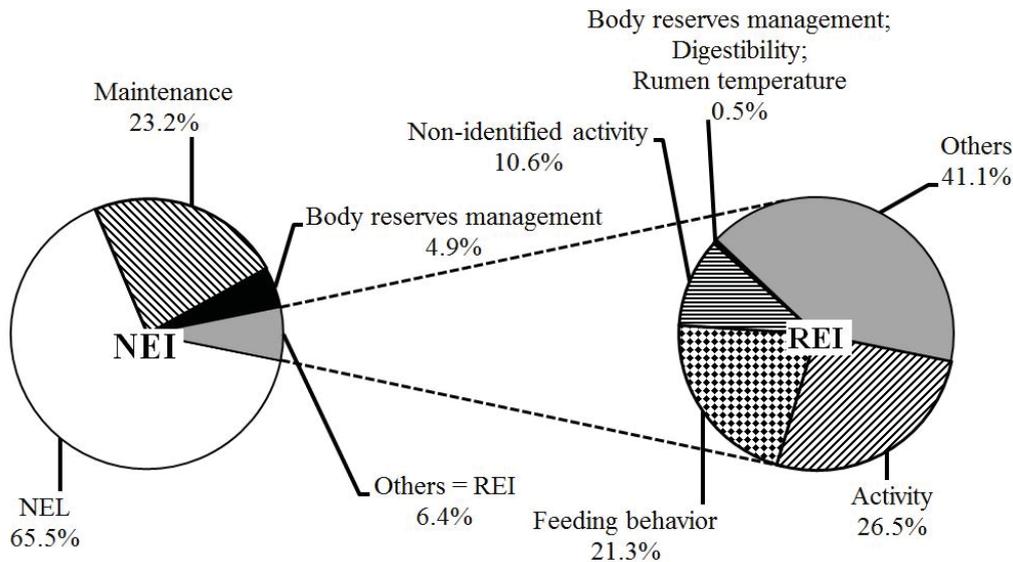


Figure 3 Contribution of each lactation averaged biological trait to both lactation averaged net energy intake (NEI) and feed efficiency measured with lactation averaged residual energy intake (REI) on 60 lactating dairy cows.

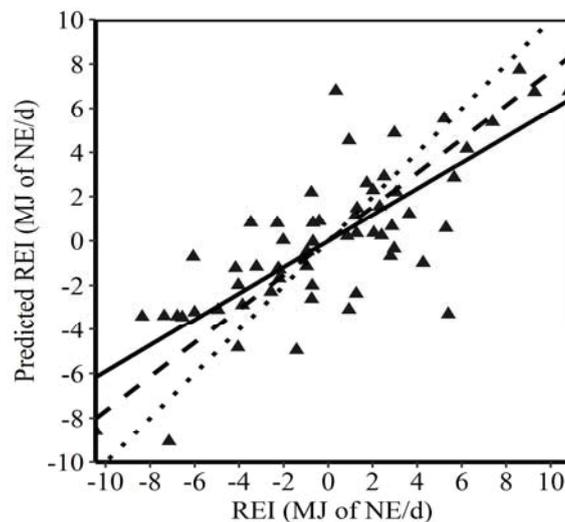


Figure 4 Relationship between observed residual energy intake (REI) and predicted REI. The dataset gathered 60 lactating dairy cows. The first bisector is shown with dotted line (...), the least squared regression line with the solid line (-) and the least rectangle fit with the dashed line (---).

Digestibility

Digestibility was negatively correlated ($r = -0.26$, $p = 0.05$ Table 2) to REI, meaning that the higher the DM digestibility, the lower the REI, i.e. the higher the feed efficiency. This correlation means that when digestibility was taken aside to explain REI, it accounted for 6.8 % of REI variability. This contribution was constant and slightly lower than those cited in literature. Potts *et al.* (2017) estimated that DM digestibility contributed between 9 and 31 % to RFI variability among dairy cows and Richardson *et al.* (2004) reported a 19 % contribution to RFI variability in beef cattle. The 10 % most efficient cows in the present study had a 0.03 higher DM digestibility compared to the 10 % least efficient cows ($p = 0.08$, Table 2). In lactating dairy cows Rius *et al.* (2012) observed that the 8 most efficient cows fed on an energy rich pasture diet had a higher digestibility than the 8 least efficient cows (78.5 % vs. 77.3 %, $p = 0.07$). In other species, some studies showed similar relationships, with the most efficient animals having a higher DM digestibility (Nkrumah *et al.*, 2006; Krueger *et al.*, 2009 in steers; Mauch *et al.*, 2015 in pigs). However, other studies were not able to prove this relationship (Fitzsimons *et al.*, 2014; McDonnell *et al.*, 2016 in beef; Montagne *et al.*, 2014 in pigs). For a given species, diets and methods used to estimate digestibility were not similar between all studies and may explain why the results diverged. Indeed studies carried out by Mauch *et al.* (2015) on pigs and Potts *et al.* (2017) on dairy cows showed that the relationship between feed efficiency and digestibility was more significant for diets which are more difficult for animals to digest, such as high fiber diets in pigs or in dairy cows. When fed on a low starch diet, the most efficient cows had 2 points higher digestibility than the least efficient cows (64.2 % vs. 62.4 %, $p < 0.05$) whereas the 1 point higher digestibility was not significant when animals were fed on a high starch diet (Potts *et al.*, 2017).

The aforementioned contribution to REI variability was weak and fell to almost 0 % when all other variables were included in the PLSr to explain REI (Figure 3). When all traits associated with behavior and activity were excluded from PLSr, DM digestibility contributed only to 2.8 % of REI variability. This contribution increase from 0 to 2.8 % suggested apparent confused effects between DM digestibility and behavior traits, especially with feeding patterns, even if the correlations between DM digestibility and feeding behavior traits were weak (Table 3). This confusion may highlight that the other biological traits measured may either contribute to or be the consequence of DM digestibility, which suggests that digestibility may be involved in REI differences between cows. Numerous studies have also observed a relationship between DM digestibility and feeding patterns in cattle (Shabi *et al.*, 1999; Connor *et al.*, 2012; Fitzsimons *et al.*, 2014) where more frequent meals (Shabi *et al.*, 1999) or lower eating

Table 2 Comparison of efficient (L-REI, 6 cows), medium (Medium, 48 cows) and inefficient (H-REI, 6 cows) groups of cows according to their lactation average values for net energy intake (NEI) and the potential determinants of feed efficiency. Pearson correlation (r) between each variable and residual energy intake (REI) and variables selected by partial least square regression (PLSr) are also indicated.

Variables ¹	REI groups			SEM	P ²	r	P ³	PLSr ⁴
	L-REI	Medium	H-REI					
DMI (kg/d)	19.4 ^a	21.7 ^{ab}	23.3 ^b	0.04	0.034	0.25	0.050	No
NEI (MJ of NE/d)	129 ^a	144 ^{ab}	155 ^b	0.3	0.035	0.25	0.052	No
MilKE (MJ of NE/d)	86	94	94	0.2	0.438	0.00	1.000	No
MY (kg/d)	28.1	31.1	31.0	0.08	0.379	0.02	0.854	No
MFY (g/d)	1,066	1,156	1,155	3.3	0.581	-0.03	0.827	No
MPY (g/d)	879	953	961	2.3	0.438	0.04	0.776	No
BW (kg)	615	621	645	1.2	0.703	0.00	0.987	No
BCS	2.24	2.03	2.07	0.005	0.298	-0.08	0.552	No
BCS_loss	0.4	0.4	0.4	0.004	0.992	0.02	0.885	No
BCS_gain	0.8	0.7	0.9	0.005	0.354	-0.01	0.956	No
REI (MJ of NE/d)	-8 ^a	0 ^b	8 ^c	0.07	0.000	1.00	0.000	Yes
Milk Lactose (g/kg)	48.1	49.2	48.9	0.3	0.652	0.12	0.375	No
Nbr_BCSchange	4.8	4.8	3.8	0.03	0.375	-0.30	0.021	Yes
Blood Glucose (mg/dL)	79.2	81.0	81.0	0.06	0.580	0.10	0.446	No
Blood NEFA (µmol/L)	212	245	186	1.3	0.168	-0.07	0.594	No
DM digestibility	0.73	0.72	0.70	0.0003	0.076	-0.26	0.049	Yes
SDTempcor (°C)	0.20 ^a	0.22 ^{ab}	0.24 ^b	0.001	0.042	0.36	0.004	Yes
MeanTempcor (°C)	39.1	39.2	39.2	0.002	0.193	0.21	0.116	No
Time_eating (min/d)	172	148	128	0.7	0.164	-0.39	0.002	Yes
Time_rum (min/d)	529 ^{ab}	528 ^b	485 ^a	0.6	0.016	-0.23	0.083	Yes
Time_other (min/d)	187 ^a	208 ^{ab}	228 ^b	0.5	0.051	0.50	0.000	Yes
Mean_otheract	0.19	0.22	0.24	0.001	0.164	0.36	0.004	Yes
Time_resting (min/d)	443	439	467	0.6	0.202	0.08	0.568	No
Time_overact (min/d)	106	115	130	0.3	0.097	0.33	0.010	No
Mean_overact	0.13	0.14	0.16	0.001	0.448	0.24	0.060	No
Time_stand (min/d)	867	867	881	0.3	0.079	0.30	0.021	No

^{a-c}Means within a row with different superscripts differ (P < 0.05).

¹NE = net energy; NEI = net energy intake; MY = milk yield ; MFY = milk fat yield ; MPY = milk protein yield; BCS was scored from 0 for emaciated to 5 for fat cow with 0.25 increment; Nbr_BCSchange = number of inflexion points in BCS kinetic throughout the lactation; NEFA = blood concentration in non-esterified fatty acids; MeanTempcor = average rumen temperature corrected for drinkings; SDTempcor = SD of the daily corrected rumen temperature; Time_eating = time past eating daily; Time_rum = time past ruminating daily; Time_resting = time past resting daily; Time_over = time past in overactivity daily; Time_other = time past doing non-identified activity, different from eating, ruminating, resting or overactivity; Time_stand = time past standing daily; Mean_otheract = average score for non-identified activity intensity going from 0 for no activity to 10 with 1 unit increment; Mean_overact = average score for overactivity intensity going from 0 for no activity to 10 with 1 unit increment.

²P-value from analysis of variance of REI from the 3 groups comparison.

³P-value associated with Pearson correlation between the variable and REI.

⁴No = variable not selected in the partial least square regression; Yes = variable selected in the partial least square regression

Table 3 Variance and correlation matrix of the lactation averaged measured traits for the population of 60 Holstein cows with the Pearson correlations below the diagonal and the variance in bold on the diagonal.

Traits ¹	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
1. DMdigestibility (%)	0,00042															
2. SDTempcor (°C)	-0,20	0,0011														
3. MeanTempcor (°C)	-0,13	0,51	0,011													
4. Mean_other (min/d)	-0,06	0,13	0,05	0,0021												
5. Mean_overact (min/d)	-0,16	0,26	0,23	0,71	0,0012											
6. Time_eating (min/d)	0,16	-0,34	-0,24	-0,74	-0,75	1661										
7. Time_rum (min/d)	-0,04	0,01	0,02	0,21	0,30	-0,19	1272									
8. Time_resting (min/d)	0,09	0,02	-0,03	-0,41	-0,46	0,16	-0,87	1285								
9. Time_overact (min/d)	-0,20	0,32	0,30	0,56	0,93	-0,77	0,11	-0,27	404							
10. Time_other (min/d)	-0,14	0,21	0,14	0,89	0,60	-0,84	0,03	-0,21	0,57	857						
11. Time_stand (min/d)	-0,11	0,18	0,23	0,15	-0,02	-0,01	-0,37	0,22	0,01	0,19	239					
12. Glucose (mg/dL)	0,26	-0,29	-0,23	0,18	-0,05	-0,03	-0,16	-0,01	-0,05	0,30	0,03	14,2				
13. NEFA (µmol/L)	-0,04	0,11	-0,08	0,32	0,21	-0,33	0,38	-0,27	0,10	0,26	-0,20	-0,13	6275			
14. Nbr_BCSchange	-0,02	0,16	0,13	0,20	0,25	-0,06	0,20	-0,25	0,13	0,07	0,01	0,06	-0,03	2,4		
15. Milk Lactose (g/kg)	0,22	-0,07	-0,03	0,17	0,02	-0,06	0,04	-0,21	0,04	0,27	-0,08	0,53	-0,04	0,10	2,8	
16. BW (kg)	-0,10	-0,12	-0,08	-0,32	-0,29	0,27	-0,20	0,38	-0,27	-0,40	0,10	-0,37	-0,26	-0,31	-0,51	4889

¹DMdigestibility = dry matter digestibility; SDTempcor = standard deviation of the daily rumen temperature; MeanTempcor = average rumen temperature corrected for drinking effect; Mean_Other = average score for non-identified activity (score from 0 for no activity to 10 for highest non-identified activity); Mean_overact = average score for overactivity (score from 0 for no activity to 10 for highest non-identified activity); Time_eating = average of daily time past eating; Time_rum = average of daily time past ruminating; Time_resting = average of daily time past resting; Time_overact = average of daily time past in overactivity; Time_other = average of daily time past in non-identified activity; Time_stand = average of daily time past standing; glucose = blood concentration in glucose; NEFA = blood concentration in non-esterified fatty acids; Nbr_BCSchange = number of inflexion points in BCS kinetic throughout the lactation.

rate (Connor *et al.*, 2012; Fitzsimons *et al.*, 2014) were associated with higher DM digestibility. A hypothesis could be that having lower eating rate or more frequent meals could increase comminution efficiency and thus increase digestibility. Further investigation is needed to better understand the causal relationship between behavior pattern and DM digestibility, especially looking at the effect of meals frequency, intake rate and comminution efficiency on both digestibility and feed efficiency.

The weak contribution of DM digestibility to REI variability observed in the present study in comparison to literature is probably due to the lack of accuracy in indirect measure of cow-specific DM digestibility using ytterbium. When comparing DM digestibility measured using an indirect method to the use of the gold standard, our indirect method had a coefficient of variation of 0.04 which was 2.4 times higher than coefficient of variation of the gold standard (Delagarde, unpublished data). The conclusion of this method comparison was that this indirect method was only able to identify the 6 % highest and 6 % lowest digestibility. Considering the 2.4 higher coefficient of variation for our indirect method, if the gold standard had been used, the 0.03 DM digestibility difference between the least and the most efficient cows (Table 2) may in reality probably be about 0.013 difference. This 0.013 difference is consistent with the 0.01 difference observed by Rius *et al.* (2012). A second limit of using and interpreting individual DM digestibility data is that measurement repeatability throughout lactation is not well established, even for the gold standard, especially because the methods are not adapted for frequent measures.

Feeding Behavior and Rumen Temperature

Time spent eating and ruminating accounted for 21.3 % of REI variability (Figure 3) with a negative relationship between REI and both of these activities. The more time the cow spent eating ($p = 0.002$, Table 2) and ruminating ($p < 0.1$, Table 2), the more efficient the cow was. The relationship between REI and time spent eating observed in the present study was at odds with results recorded in literature on other species. Indeed most papers in beef cattle (Nkrumah *et al.*, 2006; Fitzsimons *et al.*, 2014; McGee *et al.*, 2014), in pigs (Meunier-Salaün *et al.*, 2014) and in poultry (Xu *et al.*, 2016) reported a positive and strong relationship between RFI and time spent eating. In dairy cows this relationship is more contested, with some studies showing a strong and positive relationship ($r = 0.58$ in Xi *et al.*, 2016) and others reporting a weak correlation ($r = -0.04$ in Connor *et al.* 2013 or 0.06 in Kelly *et al.*, 2010). The positive and strong relationship they found in growing animals compared to dairy cows indicated that the more time animals spent eating on a daily basis, the less efficient they were.

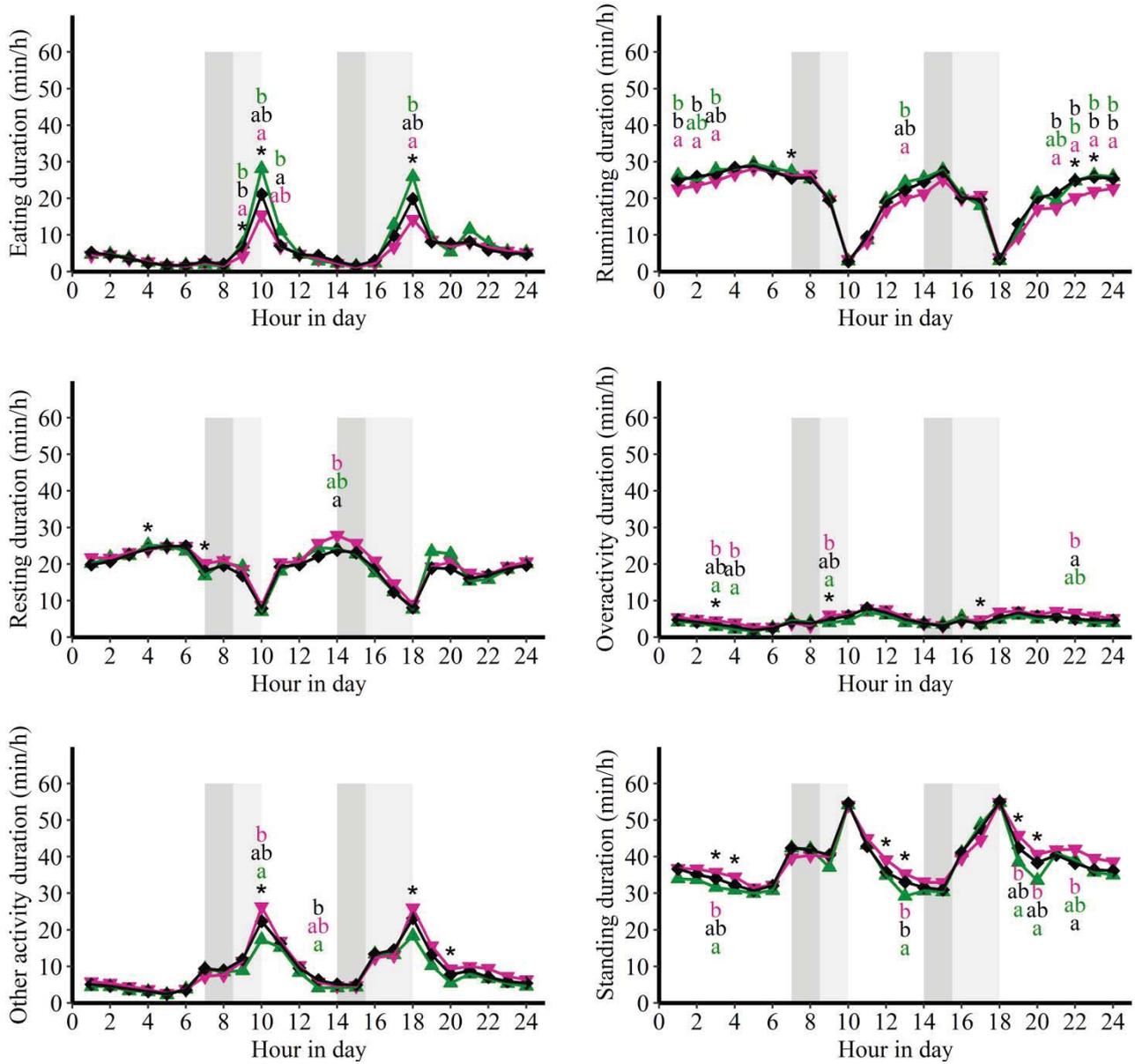


Figure 5 Lactation averaged kinetic of behavior and standing pattern throughout the daily 24 hours. Three groups were built: one with the 10% most efficient (\blacktriangle efficient, 6 cows), one with the 10% least efficient (\blacktriangledown inefficient, 6 cows) and the rest of the lactating dairy cows (\blacklozenge medium, 48 cows). Groups having different letter superscript for the same hour are significantly different at $P < 0.05$. The dark grey rectangles are for hours where cows have not access to feed and light grey rectangles are for hours where cows are locked at the feed fence.

This relationship suggested that the most efficient animals need less time to eat less feed, especially because for similar energy requirements, the most efficient animals eat less than the least efficient ones. Indeed, this hypothesis is especially valid in growing animals where DM intake and eating duration are positively correlated to each other (Hyun and Ellis, 2001; Do *et al.*, 2013 in pigs and McGee *et al.*, 2014 in beef cattle) while weakly correlated in lactating dairy cows (Rook and Huckle, 1996). In dairy cows the weak relationship between RFI and time spent eating may hide animal differences in eating rate, as suggested by the positive correlation of 0.56 between DM intake and eating rate (Kelly *et al.*, 2010). Because the relationship is more contested in dairy cows, it is difficult to draw a conclusion about the relevance of the correlation found in present study.

The different relationship between REI and eating duration when comparing the present study with literature or even across literature in dairy cows may also be explained by the diversity of feeding management. Relationships involving feeding behaviors are highly dependent on feeding management (Jarrige *et al.*, 1995). The particular configuration we had on-farm may have forced the cows to eat within the 2.5 hours when they were locked in the feeding trough (Figure 5), which may result in individual behavior different from free-access to feed, usually reported in literature. All these interpretations assumed that the logger had correctly characterized eating behavior. However, the differing results between the present study and literature studies using the gold standard for eating behavior suggested that the logger used in the present study may have had difficulty for fully characterizing eating behavior. This could explain why the relationship between time spent eating and REI were not the same as in literature. Time spent eating was recorded at 149 minutes daily (Table 4) in the present study, which was lower compared to 300 minutes in DeVries *et al.* (2005) using the gold standard or between 211 (Connor *et al.*, 2013) and 266 minutes (Schirmann *et al.*, 2012) when using loggers. Individual feed troughs used in the present study were different from a traditional collective trough which was used for validation (Delagarde and Lemonnier, 2015). Because cows had to open and then to keep the trough door open to eat, their eating behavior was different from eating behavior in a traditional collective feed trough. The logger may have missed this aspect of eating behavior and may have attributed it as a “non-identified activity”. Supposing that part of eating behavior was classified as a non-identified activity, then the positive and significant correlation with REI ($r = 0.50$, $p < 0.001$ Table 2) was coherent with previously cited results from literature about eating duration and RFI. Oppositely, the measured ruminating durations were consistent with literature studies, using either the gold standard or loggers. Mean ruminating duration was 524 min/d (Table 4) in the present study,

Table 4 Mean, standard deviation (SD), minimum (Min) and maximum (Max) of lactation averaged variables (60 Holstein cows) included in the feed efficiency model (REI model component) and of the potential determinants of feed efficiency (Determinants).

Variables ¹	Mean	SD	Min	Max
REI model component				
NEI (MJ of NE/d)	143	17.8	111	182
NEL (MJ of NE/d)	93	14.0	71	122
MY (kg/d)	30.7	4.82	23.4	43.4
MFY (g/d)	1,147	197.5	813	1,568
MPY (g/d)	947	135.7	754	1282
BW ^{0.75} (kg ^{0.75})	125	10.4	103	147
BCSloss	0.4	0.22	0.0	0.9
BCSgain	0.7	0.31	0.3	2.0
REI (MJ of NE/d)	0	4.5	-11	11
Determinants				
Milk Lactose (g/kg)	49.1	1.67	43.2	52.1
Maintenance				
BCS	2.05	0.32	1.44	3.09
Body reserves change				
Nbr_BCSchange	4.7	1.56	1.0	8.0
Blood NEFA (µmol/L)	236	79.2	119	470
Blood glucose (mg/dL)	80.8	3.76	72.4	87.6
Temperature				
MeanTempcor (°C)	39.2	0.10	39.0	39.4
MeanTempraw (°C)	38.6	0.10	38.4	38.8
SDTempraw (°C)	1.42	0.12	1.12	1.68
SDTempcor (°C)	0.22	0.03	0.15	0.31
Digestibility	0.72	0.020	0.65	0.75
Feeding behavior				
Time_eating (min/d)	149	41	46	239
Time_rum (min/d)	524	36	366	573
Time_resting (min/d)	443	36	375	583
Time_over (min/d)	116	20	72	172
Time_other (min/d)	208	29	152	303
Time_stand (min/d)	868	15	827	907

¹NE = net energy; NEI = net energy intake ; MY = milk yield ; MF = milk fat ; MP = milk protein; REI = residual energy intake; BCS was scored from 0 for emaciated to 5 for fat cow with 0.25 increment; Nbr_BCSchange = number of inflexion points in BCS kinetic throughout the lactation; NEFA = blood concentration in non-esterified fatty acids; MeanTempcor = average rumen temperature corrected for drinkings; MeanTempraw = average rumen temperature; SDTempraw = SD of the daily raw rumen temperature; SDTempcor = SD of the daily corrected rumen temperature; Time_eating = time past eating daily; Time_rum = time past ruminating daily; Time_resting = time past resting daily; Time_over = time past in overactivity daily; Time_other = time past doing non-identified activity, different from eating, ruminating, resting or overactivity; Time_stand = time past standing daily.

which was similar to literature references where cows spent around 550 minutes per day ruminating (Schirmann *et al.*, 2012; Clément *et al.*, 2014; Delagarde and Lemonnier, 2015). The most efficient 10 % of cows spent 44 minutes more time ruminating daily than the least efficient 10 % (Table 2). Literature is poorly documented with regards to the relationship between feed efficiency and ruminating behavior. A potential hypothesis could be that higher ruminating time, characterizing the most efficient cows, may contribute to higher digestibility, thanks to higher comminution efficiency. More studies are required to test the relationship between digestibility and rumination.

In any case, these results and results present in literature suggested that feeding behavior differences between cows were associated with feed efficiency differences. To detect whether feeding behavior was confused with other biological traits measured in present study PLSr explaining REI variability was fitted over all traits except those associated with behavior and activity. This PLSr showed that behavior traits absorbed variability associated with DM digestibility, body reserves change and rumen temperature traits because all these traits increased their contribution from near 0 % to 27.8 % for rumen temperature, 20.7 % for body reserves change and 2.8 % for DM digestibility.

The variability of rumen temperature may reflect variability in heat production. The higher the daily variability of corrected rumen temperature, the higher the REI ($r = 0.36$, Table 2). The most efficient 10 % of cows had a less variable daily rumen temperature than the least efficient 10 % of cows ($p < 0.05$, Table 2). It can therefore be hypothesized that differences between cows in daily variability of corrected rumen temperature may reflect eating rate and meal size differences, with the most variable temperature being associated with a high eating rate and big meals. The higher the daily variability of rumen temperature ($r = -0.34$, $p < 0.05$ Table 3) and the higher the average rumen temperature ($r = -0.24$, $p = 0.11$ Table 3), the lower the time spent eating on a daily basis. This negative relationship combined with the contribution increase occurring when all traits associated with behavior were excluded from PLSr suggested that traits associated with rumen temperature may reflect feeding patterns. However, when fitting a linear regression to explain the daily variation of rumen temperature with daily behavior durations, eating, non-identified activity and standing durations explained only 27.4 % of the variability of daily rumen temperature variability. Most of the differences between cows in daily rumen temperature variability may thus reflect other processes, which were not recorded in present study, such as rumen size differences or digestive transit rate differences. Further investigations are needed to validate the negative relationship between REI and daily rumen temperature variability and also to better understand the causal

relationship between feeding behavior, daily variability in rumen temperature and feed efficiency.

Maintenance and Activity

Maintenance contributed to 23.2 % of NEI variability (Figure 3) and did not contribute to REI variability with a correlation of 0 ($p = 0.99$) between BW and REI, and of - 0.08 ($p = 0.55$) between BCS and REI. The observed contribution of 23.2 % of maintenance to NEI variability was slightly higher than the standard contribution of 14.5 % calculated with the French feeding systems requirements INRA (2010). Similarly, lactation energy and body reserves change contribution to NEI variability were smaller than contributions estimated using INRA (2010): NE_L contributed to NEI variability at 65.5 % in our study (Figure 3) and 70.6 % using INRA (2010) and body reserves change contributed to NEI variability at 4.9 % in our study (Figure 3) and 6.8 % using INRA (2010). The difference between contributions estimated in the present study and those calculated using INRA (2010) may be due to existing covariance between maintenance and milk yield requirements. The difference is that one method assigned part of NEI variability to NEL while the other method assigned part of NEI variability to metabolic BW.

The population average level of activity, which is inherent to environmental conditions, is usually included in maintenance requirements estimated with national feeding system requirements (Cannas *et al.*, 2010) while activity specific to each cow is not included in maintenance requirements. In the present study, physical activity differences between cows appeared positively correlated with REI: the most time the cow spent standing ($r = 0.30$, $p = 0.02$) or in overactivity ($r = 0.24$, $p = 0.06$), the least efficient the cow was (Table 2). In the present study, activity contributed at 26.5 % to REI variability (Figure 3). Standing time recorded in the present study was consistent with literature studies, which claimed for method validity and for standing duration validity in the present study. Time spent standing was 868 min/d (Table 4) which was comparable to reference time of 780 min/d observed in De Vries *et al.* (2005) with the gold standard and around 700 (Schirmann *et al.*, 2012) and 900 min/d (Hart *et al.*, 2014) when using loggers. The positive correlations found in the present study between activity traits and REI were also found in steers by Richardson *et al.* (2004) but were not significant in heifers both in Lawrence *et al.* (2012, $p > 0.05$) and Hafla *et al.* (2013, $p = 0.99$). The significance of the positive correlation is dependent on environmental factors: difference was higher and significant ($p < 0.05$) for grazing heifers compared to heifers fed and housed indoors (Lawrence *et al.*, 2012). Differences among environmental conditions

raise the question of the place of individual activity differences in feed efficiency, especially considering environmental conditions. An approach could be to identify if a more active animal could be an interesting investment for farmers, distinguishing for example grazing conditions and indoor stalls.

Body reserves Change

Body reserves change explained 4.9 % of NEI variability (Figure 3) in model (2), but model (2) residuals, i.e. REI, still included variability associated with body reserves change because the more frequent BCS changed throughout lactation, the more efficient the cow was ($r = -0.30$, $p = 0.02$, Table 2). For similar amount of mobilized or gained body reserves throughout lactation, the most efficient seemed to be cows having shorter periods of mobilization or accretion, meaning that BCS change occurring for each period might be smaller for the most efficient cows. The way a cow gains or loses its reserves throughout lactation seemed important to explain additional NEI differences between cows. This result is not consistent with the assumed linear relationship between BCS and body lipids content (Wright and Russel, 1984; Roche *et al.*, 2009). This linear relationship implies that similar BCS change between two cows should cost the same energetic value, regardless of the way lipids are gained or mobilized. Further work is needed to characterize the relationship between body lipids content and BCS: linear or quadratic. Because correlation between REI and BCS was weak ($r = -0.08$, $p = 0.55$ Table 2), REI differences may not be associated with average body composition differences but may be associated with body composition differences throughout lactation, especially because different body compositions have different energetic costs (Chilliard *et al.*, 1987).

Conclusion

This study measured the individual variability of feed efficiency for lactating dairy cows using residual energy intake, which was calculated as net energy intake corrected for net energy for lactation, metabolic BW and body condition gain and loss. A partial least square regression was used to explain residual energy intake variability with all measured traits. Of all measured traits, feeding patterns, activity, rumen temperature, body reserves change and digestibility explained 58.9 % of residual energy intake phenotypic variability, equivalent to 3.8 % of net energy intake phenotypic variability. These 58.9 % were mainly explained by activity (26.5 %) and feeding behavior (21.3 %). However when all traits associated with behavior were excluded from analysis, the same amount of residual energy intake variability

was explained by rumen temperature, body reserves change and digestibility, claiming for confused effects of the measured traits. Present results were not sufficient to draw definitive conclusions on the biological determinants of feed efficiency. Further investigation is needed to characterize the causal relationship between feed efficiency and feeding behavior, digestibility, body reserves change, activity and rumen temperature.

Acknowledgements

The authors would like to thank all technical staff at INRA Méjusse experimental farm who helped managing and monitoring the long-term experimentation carried out in this study, Thibaud Le Mouél for laboratory analyzes and Medria (Châteaubourg, France) for their availability and responsiveness in solving technical problems and for making the sensor data available. This work was funded by the national project Deffilait (ANR-15-CE20-0014) and APIS-GENE.

References

- Aggrey, S. I. E. and R. Rekaya. 2013. Dissection of Koch's residual feed intake: Implications for selection. *Poult. Sci.* 92:2600-2605. <http://dx.doi.org/10.3382/ps.2013-03302>
- Bazin, S. 1984. Grille de notation de l'état d'engraissement des vaches Pie Noires. ed. L'institut technique de l'élevage bovin, Paris, France.
- Berry, D. P. and J. J. Crowley. 2013. CELL BIOLOGY SYMPOSIUM: Genetics of feed efficiency in dairy and beef cattle1. *J. Anim. Sci.* 91:1594-1613. doi: <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2012-5862>.
- Cannas, A., A. S. Atzori, I. A. M. A. Teixeira, R. D. Sainz, and J. W. Oltjen. 2010. The energetic cost of maintenance in ruminants: from classical to new concepts and prediction systems. Pages 531-542 in *Energy and protein metabolism and nutrition*. G.M. Croveto, ed. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
- Chilliard, Y., B. Rémond, J. Agabriel, J. Robelin, and R. Verite. 1987. Variations du contenu digestif et des réserves corporelles au cours du cycle gestation-lactation. *Bulletin Technique Centre de Recherches Zootechniques et Vétérinaires de Theix* 70:117-131.
- Clément, P., R. Guatteo, L. Delaby, B. Rouillé, A. Chanvallon, J. M. Philipot, and N. Bareille. 2014. Short communication: Added value of rumination time for the prediction of dry matter intake in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97:6531-6535. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7860>.
- Coleman, J., D. P. Berry, K. M. Pierce, A. Brennan, and B. Horan. 2010. Dry matter intake and feed efficiency profiles of 3 genotypes of Holstein-Friesian within pasture-based systems of milk production. *J. Dairy Sci.* 93:4318-4331. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2686>.

- Connor, E. E., J. L. Hutchison, K. M. Olson, and H. D. Norman. 2012. TRIENNIAL LACTATION SYMPOSIUM: Opportunities for improving milk production efficiency in dairy cattle. *J. Anim. Sci.* 90:1687-1694. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2011-4528>.
- Connor, E. E., J. L. Hutchison, H. D. Norman, K. M. Olson, C. P. Van Tassell, J. M. Leith, and R. L. Baldwin. 2013. Use of residual feed intake in Holsteins during early lactation shows potential to improve feed efficiency through genetic selection. *J. Anim. Sci.* 91:3978-3988. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2012-5977>.
- Dekkers, J. C. and H. Gilbert. 2010. Genetic and biological aspect of residual feed intake in pigs. Pages 1-8 in Proc. of the 9th. World Congress on Genetics applied to Livestock production, Leipzig, Livestock Production, Leipzig, Deutschland.
- Delagarde, R., E. Pérez-Ramírez, and J. L. Peyraud. 2010. Ytterbium oxide has the same accuracy as chromic oxide for estimating variations of faecal dry matter output in dairy cows fed a total mixed ration at two feeding levels. *Anim. Feed Sci. Technol.* 161:121-131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.08.006>.
- Delagarde, R. and J. P. Lemonnier. 2015. Accuracy of the FeedPhone device for recording eating and rumination times in dairy cows. Pages 203-205 in Proc. 18th Symposium of the European Grassland Federation. European Grassland Federation (EGF), Wageningen, The Netherlands.
- DeVries, T. J., M. A. G. von Keyserlingk, and K. A. Beauchemin. 2005. Frequency of Feed Delivery Affects the Behavior of Lactating Dairy Cows. *J. Dairy Sci.* 88:3553-3562. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)73040-X](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73040-X).
- DiGiacomo, K., L. Marett, B. Wales, B. Hayes, F. Dunshea, and B. Leury. 2014. Thermoregulatory differences in lactating dairy cattle classed as inefficient based on residual feed intake (RFI). *Anim Prod Sci* 54:1877-1881.
- Do, D. N., A. B. Strathe, J. Jensen, T. Mark, and H. N. Kadarmideen. 2013. Genetic parameters for different measures of feed efficiency and related traits in boars of three pig breeds. *J. Anim. Sci.* 91:4069-4079. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2012-6197>.
- Fitzsimons, C., D. A. Kenny, A. G. Fahey, and M. McGee. 2014. Feeding behavior, ruminal fermentation, and performance of pregnant beef cows differing in phenotypic residual feed intake offered grass silage. *J. Anim. Sci.* 92:2170-2181. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2013-7438>.
- Hafla, A. N., G. E. Carstens, T. D. A. Forbes, L. O. Tedeschi, J. C. Bailey, J. T. Walter, and J. R. Johnson. 2013. Relationships between postweaning residual feed intake in heifers and forage use, body composition, feeding behavior, physical activity, and heart rate of pregnant beef females. *J. Anim. Sci.* 91:5353-5365. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2013-6423>.
- Hart, K. D., B. W. McBride, T. F. Duffield, and T. J. DeVries. 2014. Effect of frequency of feed delivery on the behavior and productivity of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97:1713-1724. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7504>.

- Höskuldsson, A. 1988. PLS regression methods. *J Chemom* 2:211-228. <http://dx.doi.org/10.1002/cem.1180020306>.
- Hou, Y., D. Bickhart, H. Chung, J. Hutchison, H. D. Norman, E. Connor, and G. Liu. 2012. Analysis of copy number variations in Holstein cows identify potential mechanisms contributing to differences in residual feed intake. *Funct. Integr. Genomics* 12:717-723. <http://dx.doi.org/10.1007/s10142-012-0295-y>.
- Hyun, Y. and M. Ellis. 2001. Effect of group size and feeder type on growth performance and feeding patterns in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 79:803-810. <http://dx.doi.org/10.2527/2001.794803x>.
- IAASTD. 2009. Global report. Page 606 in *Agriculture at a crossroads- Global report*. B. D. McIntyre, H. R. Herren, J. Wakhungu, and R. T. Watson, ed. International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (IAASTD), Washington, USA. Accessed 12/19/2016 on: [http://www.unep.org/dewa/agassessment/reports/IAASTD/EN/Agriculture%20at%20a%20Crossroads_Global%20Report%20\(English\).pdf](http://www.unep.org/dewa/agassessment/reports/IAASTD/EN/Agriculture%20at%20a%20Crossroads_Global%20Report%20(English).pdf).
- Institut National de la Recherche Agronomique. 2010. *Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeurs des aliments: tables Inra 2007 mise à jour 2010*. ed. Editions Quae, Versailles, France.
- Jarrige, R., J. P. Dulphy, P. Faverdin, R. Baumont, and C. Demarquilly. 1995. Activités d'ingestion et de rumination. Pages 123-181 in *Nutrition des ruminants domestiques ingestion et digestion*. R. Jarrige, Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M. H. Farce, and M. Journet, ed. Editions INRA, Paris, France.
- Kelly, A. K., M. McGee, D. H. Crews, A. G. Fahey, A. R. Wylie, and D. A. Kenny. 2010. Effect of divergence in residual feed intake on feeding behavior, blood metabolic variables, and body composition traits in growing beef heifers. *J. Anim. Sci.* 88:109-123. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2009-2196>.
- Knap, P. W. and L. Wang. 2012. Pig breeding for improved feed efficiency. Pages 167-181 in *Feed efficiency in swine*. J. F. Patience, ed. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
- Krueger, W. K., G. E. Carstens, R. R. Gomez, B. M. Bourg, P. A. Lancaster, L. J. Slay, J. C. Miller, R. C. Anderson, S. M. Horrocks, N. A. Krueger, and T. D. A. Forbes. 2009. Relationships between residual feed intake and apparent nutrient digestibility, in vitro methane producing activity and VFA concentrations in growing Brangus heifers. *J. Anim. Sci.* 87(E-Suppl. 2):129. (Abstr.)
- Lawrence, P., D. A. Kenny, B. Earley, and M. McGee. 2012. Grazed grass herbage intake and performance of beef heifers with predetermined phenotypic residual feed intake classification. *Animal* 6:1648-1661. <http://dx.doi.org/10.1017/s1751731112000559>.

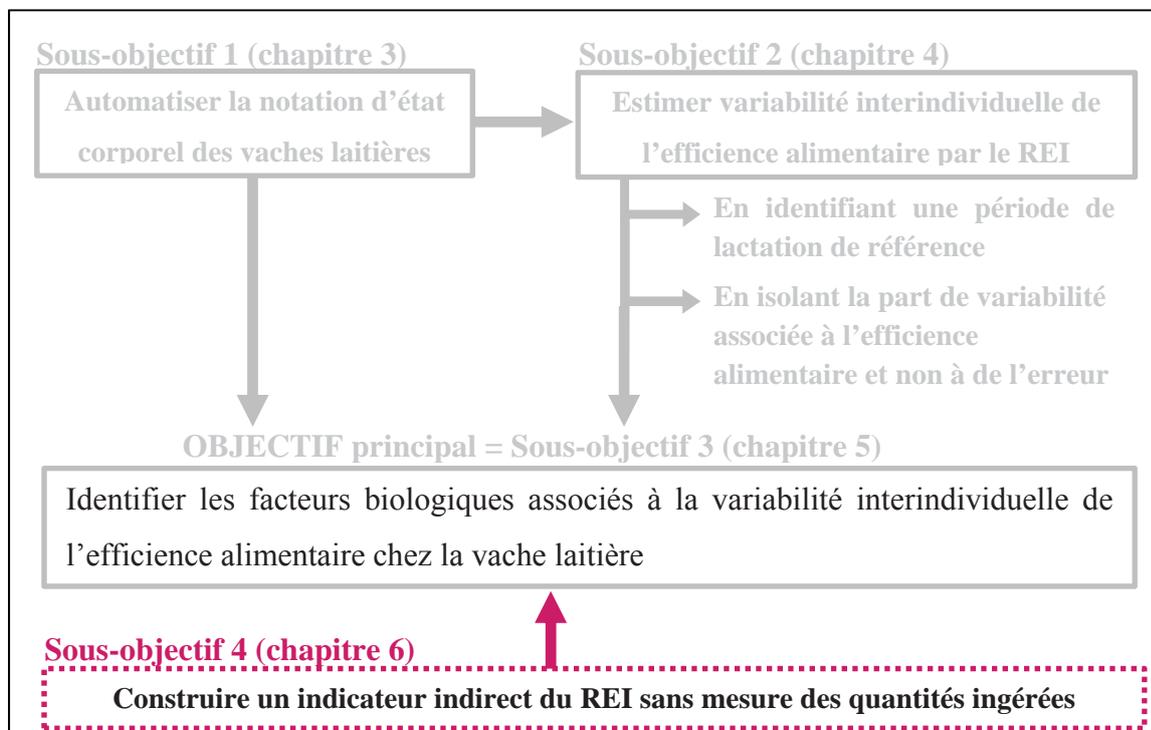
- Lê Cao, K.-A., S. Boitard, and P. Besse. 2011. Sparse PLS discriminant analysis: biologically relevant feature selection and graphical displays for multiclass problems. *BMC Bioinformatics* 12:253-253. <http://dx.doi.org/10.1186/1471-2105-12-253>.
- Macdonald, K. A., J. E. Pryce, R. J. Spelman, S. R. Davis, W. J. Wales, G. C. Waghorn, Y. J. Williams, II, L. C. Marett, and B. J. Hayes. 2014. Holstein-Friesian calves selected for divergence in residual feed intake during growth exhibited significant but reduced residual feed intake divergence in their first lactation. *J. Dairy Sci.* 97:1427-1435. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7227>.
- Manafiazar, G., L. Goonewardene, F. Miglior, D. H. J. Crews, J. A. Basarab, E. Okine, and Z. Wang. 2016. Genetic and phenotypic correlations among feed efficiency, production and selected conformation traits in dairy cows. *Animal* 10:381-389. <http://dx.doi.org/10.1017/S1751731115002281>.
- Mantysaari, P., A. E. Liinamo, and E. A. Mantysaari. 2012. Energy efficiency and its relationship with milk, body, and intake traits and energy status among primiparous Nordic Red dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 95:3200-3211. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2011-4685>.
- Mauch, E. D., N. K. Gabler, N. V. Serão, T. E. Weber, J. F. Patience, B. Kerr, and J. C. M. Dekkers. 2015. Effect of low energy, high fiber diets on digestibility traits in pigs selected for residual feed intake. *Animal Industry Report: AS 661, ASL R3033*. Accessed 19/12/2016 on: http://lib.dr.iastate.edu/ans_air/vol661/iss1/96.
- McDonnell, R. P., K. J. Hart, T. M. Boland, A. K. Kelly, M. McGee, and D. A. Kenny. 2016. Effect of divergence in phenotypic residual feed intake on methane emissions, ruminal fermentation, and apparent whole-tract digestibility of beef heifers across three contrasting diets. *J. Anim. Sci.* 94:1179-1193. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2015-0080>.
- McGee, M., J. A. Ramirez, G. E. Carstens, W. J. Price, J. B. Hall, and R. A. Hill. 2014. Relationships of Feeding Behaviors with efficiency in RFI-divergent Japanese Black Cattle. *J. Anim. Sci.* 92:3580-3590. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2013-7360>.
- Meunier-Salaün, M. C., C. Guérin, Y. Billon, P. Sellier, J. Noblet, and H. Gilbert. 2014. Divergent selection for residual feed intake in group-housed growing pigs: characteristics of physical and behavioural activity according to line and sex. *Animal* 8:1898-1906. <http://dx.doi.org/10.1017/s1751731114001839>.
- Montagne, L., F. Loisel, T. Le Naou, F. Gondret, H. Gilbert, and M. Le Gall. 2014. Difference in short-term responses to a high-fiber diet in pigs divergently selected for residual feed intake. *J. Anim. Sci.* 92:1512-1523. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2013-6623>.
- Nkrumah, J. D., E. K. Okine, G. W. Mathison, K. Schmid, C. Li, J. A. Basarab, M. A. Price, Z. Wang, and S. S. Moore. 2006. Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. *J. Anim. Sci.* 84:145-153. <http://dx.doi.org/10.2527/2006.841145x>.

- Potts, S. B., J. P. Boerman, A. L. Lock, M. S. Allen, and M. J. VandeHaar. 2017. Relationship between residual feed intake and digestibility for lactating Holstein cows fed high and low starch diets. *J. Dairy Sci.* 100:265-278. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2016-11079>.
- R Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. in R foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available on: <http://www.R-project.org/>.
- Richardson, E. C. and R. M. Herd. 2004. Biological basis for variation in residual feed intake in beef cattle. 2. Synthesis of results following divergent selection. *Aust J Exp Agric* 44:431-440. <http://dx.doi.org/10.1071/EA02221>.
- Richardson, E. C., R. M. Herd, J. A. Archer, and P. F. Arthur. 2004. Metabolic differences in Angus steers divergently selected for residual feed intake. *Aust J Exp Agric* 44:441-452. <http://dx.doi.org/10.1071/EA02219>.
- Rius, A. G., S. Kittelmann, K. A. Macdonald, G. C. Waghorn, P. H. Janssen, and E. Sikkema. 2012. Nitrogen metabolism and rumen microbial enumeration in lactating cows with divergent residual feed intake fed high-digestibility pasture. *J. Dairy Sci.* 95:5024-5034. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-5392>.
- Robinson, D. L. 2005. Assessing the accuracy of modelling weight gain of cattle using feed efficiency data. *Livest. Prod. Sci.* 95:187-200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livprodsci.2004.12.016>.
- Roche, J. R., N. C. Friggens, J. K. Kay, M. W. Fisher, K. J. Stafford, and D. P. Berry. 2009. Invited review: Body condition score and its association with dairy cow productivity, health, and welfare. *J. Dairy Sci.* 92:5769-5801. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2431>.
- Rook, A. J. and C. A. Huckle. 1996. Sources of variation in the grazing behaviour of dairy cows. *J Agric Sci* 126:227-233. <http://dx.doi.org/10.1017/s0021859600073184>.
- Schirmann, K., N. Chapinal, D. M. Weary, W. Heuwieser, and M. A. G. von Keyserlingk. 2012. Rumination and its relationship to feeding and lying behavior in Holstein dairy cows. *J. Dairy Sci.* 95:3212-3217. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2011-4741>.
- Shabi, Z., I. Bruckental, S. Zamwell, H. Tagari, and A. Arieli. 1999. Effects of Extrusion of Grain and Feeding Frequency on Rumen Fermentation, Nutrient Digestibility, and Milk Yield and Composition in Dairy Cows. *J. Dairy Sci.* 82:1252-1260. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(99\)75348-8](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75348-8).
- Thornhill, J. B., L. C. Maret, M. J. Auldist, J. S. Greenwood, J. E. Pryce, B. J. Hayes, and W. J. Wales. 2014. Whole-tract dry matter and nitrogen digestibility of lactating dairy cows selected for phenotypic divergence in residual feed intake. *Anim Prod Sci* 54:1460-1464. <http://dx.doi.org/10.1071/AN14200>.
- Timsit, E., S. Assié, R. Quiniou, H. Seegers, and N. Bareille. 2011. Early detection of bovine respiratory disease in young bulls using reticulo-rumen temperature boluses. *Br. Vet. J.* 190:136-142. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tvjl.2010.09.012>.

- United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division. 2015. World population prospects: the 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables. Working Paper No. ESA/P/WP.241. Accessed 12/19/2016 on: http://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/Key_Findings_WPP_2015.pdf.
- Wold, S., A. Ruhe, H. Wold, and W. J. Dunn III. 1984. The collinearity problem in linear regression. The Partial Least Squares (PLS) approach to generalized inverses. *SIAM J Sci Comput* 5:735-743. <http://dx.doi.org/10.1137/0905052>.
- Wright, I. A. and A. J. F. Russel. 1984. Partition of fat, body composition and body condition score in mature cows. *Animal Science* 38:23-32. <http://dx.doi.org/doi:10.1017/s0003356100041313>.
- Xi, Y. M., Z. Yang, F. Wu, Z. Y. Han, and G. L. Wang. 2015. Gene expression profiling of hormonal regulation related to the residual feed intake of Holstein cattle. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 465:19-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbrc.2015.07.092>.
- Xi, Y. M., F. Wu, D. Q. Zhao, Z. Yang, L. Li, Z. Y. Han, and G. L. Wang. 2016. Biological mechanisms related to differences in residual feed intake in dairy cows. *Animal* 10:1311-1318. <http://dx.doi.org/10.1017/S1751731116000343>.
- Xu, Z., C. Ji, Y. Zhang, Z. Zhang, Q. Nie, J. Xu, D. Zhang, and X. Zhang. 2016. Combination analysis of genome-wide association and transcriptome sequencing of residual feed intake in quality chickens. *BMC Genomics* 17:1-14. <http://dx.doi.org/10.1186/s12864-016-2861-5>.
- Young, J. M. and J. C. Dekkers. 2012. The genetic and biological basis of residual feed intake as a measure of feed efficiency. Pages 153-166 in *Feed efficiency in swine*. J. F. Patience, ed. Wageningen Academic Publisher, Wageningen, The Netherlands.

Chapitre 6

Construction d'un indicateur de l'efficacité alimentaire sans mesure des quantités ingérées



Les deux chapitres précédents se sont basés sur l'estimation de l'efficacité alimentaire par l'estimation du residual energy intake. Le principal défaut de cet indicateur est la nécessité d'avoir des mesures individualisées de quantités ingérées, qui ne restent accessibles que dans certaines installations et sont très coûteuses. Une alternative serait de construire un indicateur de l'efficacité alimentaire construit avec des variables accessibles à haut débit en élevage.

L'objectif de ce chapitre est de développer un indicateur indirect du residual energy intake. Avec l'hypothèse qu'intra-ration les quantités d'eau bue sont corrélées aux quantités d'aliments ingérées, il est possible que l'efficacité de l'eau bue puisse être corrélée à l'efficacité alimentaire. L'originalité du projet consistait à imaginer que la mesure de l'eau bue par la vache pouvait être approchée à partir de données de cinétique de température ruminale. En effet, la boisson provoque une chute rapide et significative de la température ruminale. Le monitoring de la température ruminale peut être réalisé en continu grâce à des thermobolus actuellement commercialisés en élevage. Par conséquent, cette approche permettrait d'identifier les individus efficaces dans des élevages commerciaux sans passer par la mesure des quantités ingérées.

Identifier les vaches les plus efficaces grâce au monitoring de la température ruminale¹
Identifying the most efficient dairy cows from rumen temperature monitoring

A. Fischer, J. Lassalas et P. Faverdin

Poster

Résumé

L'amélioration de l'efficacité alimentaire est envisagée comme une solution pour augmenter la durabilité économique et environnementale de l'élevage, car elle contribue à réduire ou à maintenir la consommation alimentaire tout en maintenant ou augmentant la production. Cependant, l'efficacité alimentaire reste difficile à mesurer en pratique, car les quantités ingérées individuelles, qui sont requises pour la mesure, ne sont disponibles que dans certaines installations expérimentales. Le développement de nouveaux outils de monitoring offre des perspectives intéressantes pour construire un indicateur de l'efficacité alimentaire ne nécessitant pas la mesure des quantités ingérées.

En sachant que l'eau bue est très corrélée aux quantités d'aliments ingérées, notre hypothèse est que l'efficacité de l'eau bue, mesurée à partir de la température du rumen, est un bon indicateur de l'efficacité alimentaire de la vache laitière.

L'efficacité alimentaire et la température du rumen ont été mesurées pendant les 238 premiers jours de lactation pour 60 vaches laitières Holstein alimentées ad libitum avec une ration complète unique à base d'ensilage de maïs. L'efficacité alimentaire a été estimée avec le residual energy intake (**REI**). Ce REI a été calculé comme le résidu de la régression linéaire de l'énergie nette moyenne ingérée sur la lactation, en fonction de la somme de la perte quotidienne et du gain quotidien de note d'état corporel sur la lactation et de la moyenne lactation de l'énergie nette du lait et du poids vif métabolique. La température ruminale a été relevée toutes les 5 minutes par un thermobolus ruminal (San'Phone[®], Médria, France). La

¹ Ce chapitre a fait l'objet d'une communication orale et d'un poster :

Fischer A and Faverdin P 2016. Rumen temperature monitoring to assess feed efficiency of dairy cows. In 67th Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), 29/08/2016-02/09/2016, Belfast, UK, p. 405.

Fischer A, Lassalas J and Faverdin P 2016. Identifier les vaches les plus efficaces grâce au monitoring de la température ruminale. In 23ème Journées Rencontres Recherches Ruminants, 07-08/12/2016, Paris, France, p. 51.

somme journalière de l'écart entre la température ruminale corrigée de l'effet boisson et la température brute a été utilisée comme estimateur de la quantité d'eau bue (**Ecart_temp**). L'efficacité de l'eau bue a été estimée par « l'eau bue résiduelle » (**EBR**) et calculée comme le résidu de la régression linéaire de Ecart_temp moyenne sur la lactation, en fonction de la production laitière et du poids vif moyens sur la lactation.

Les deux indicateurs proposés, Ecart_temp et EBR, sont significativement corrélés avec le REI, respectivement 0,34 et 0,38, mais ces corrélations restent assez faibles. Par contre, les deux indicateurs ont identifié 50% des 10% de vaches les plus efficaces. Les 10% de vaches les plus efficaces avec l'EBR présentent un REI moyen significativement plus faible que le reste de la population de vaches et proche du REI des 10% de vaches les plus efficaces avec le REI. A l'opposé, les deux indicateurs proposés n'identifient aucune des 10% les moins efficaces. Ces deux indicateurs semblent être des proxys prometteurs, d'une part parce qu'ils sont construits sur des données de production laitière, température ruminale et poids vif, qui sont accessibles en élevage à haut débit, et d'autre part parce qu'ils identifient les vaches les plus efficaces. Ces résultats n'étant valables qu'intra-ration, une étape préalable est de tester la validité de cet indicateur avec d'autres vaches et d'autres rations. Cette étude ne présente que la première étape d'innovation et nécessite une validation externe pour établir la preuve du concept.

Identifier les vaches les plus efficaces grâce au monitoring de la température ruminale
Identifying the most efficient dairy cows from rumen temperature monitoring

A. Fischer (1,2), J. Lassalas (2) et P. Faverdin (2)

(1) Institut de l'élevage, Le Rheu, 35650, France

(2) PEGASE, Agrocampus Ouest, INRA, 35590 Saint-Gilles, France

Introduction

L'amélioration de l'efficacité alimentaire constitue un des leviers d'action possible pour gagner en durabilité, à la fois économique et environnementale, en passant par la réduction ou le maintien de la consommation alimentaire du troupeau tout en maintenant ou augmentant le niveau de production. Cette amélioration peut se faire à différentes échelles : celle du troupeau ou celle de l'animal. A l'échelle de l'animal, les études sont moins nombreuses, particulièrement chez la vache laitière. La principale raison est la difficulté à estimer l'efficacité alimentaire. L'efficacité alimentaire est classiquement estimée par l'ingéré résiduel qui se définit comme le résidu de la régression linéaire de la consommation alimentaire en fonction des principaux besoins : la synthèse de lait, l'entretien et les variations de réserves corporelles chez la vache laitière (Berry and Crowley, 2013). Le principal frein identifié reste la mesure des consommations alimentaires individuelles. Cette donnée n'est disponible que dans certaines fermes, majoritairement expérimentales, car le dispositif nécessaire est onéreux, chronophage et lourd d'entretien. A cet effet, un intérêt grandissant se dessine autour de la capacité à mesurer indirectement les quantités ingérées ou l'efficacité alimentaire chez la vache laitière (Veerkamp *et al.*, 2015).

Chez les monogastriques, Renaudeau *et al.* (2013) en porcs et Bordas *et al.* (1978) en poules pondeuses ont observé que les individus les moins efficaces consommaient plus d'eau que les plus efficaces et même que les poules atteintes de polydipsie étaient significativement moins efficaces que les poules « normales ». Une hypothèse intéressante à tester serait de vérifier si cette observation se confirme chez la vache laitière. Comme chez la vache laitière la consommation en eau est fortement corrélée à la consommation alimentaire (Khelil-Arfa *et al.*, 2012), une autre hypothèse à tester serait de vérifier si les vaches les plus efficaces pour la consommation alimentaire sont aussi les plus efficaces pour la consommation en eau. L'eau bue par la vache est une donnée qui devient accessible en élevage, notamment grâce à la commercialisation de thermobolus ruminiaux mesurant la température ruminale en continu.

La variation de la température ruminale est fortement influencée par la quantité d'eau bue (Bewley *et al.*, 2008) et en fait donc un proxy intéressant des quantités d'eau bue individuelles.

A cet effet, l'objectif de la présente étude est de vérifier si la consommation en eau des vaches laitières constitue un proxy du REI, d'une part en analysant la relation entre le REI et la consommation en eau, et d'autre part en analysant la relation entre le REI et l'efficacité de l'eau bue. Cette efficacité de l'eau bue est estimée comme le résidu de la régression linéaire de l'eau bue en fonction du volume de lait produit et du poids vif. L'eau bue est estimée par un proxy qui est basé sur la variation de la température ruminale, constituant une donnée devenant potentiellement disponible à haut débit en élevage.

Matériel et méthodes

Les données sont issues d'une expérimentation spécialement conçue pour mesurer la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire des vaches laitières. L'expérimentation a été réalisée entre août 2014 et juin 2015 à l'installation expérimentale INRA-UMR PEGASE de Méjusse (Le Rheu, France) sur un troupeau de 60 vaches laitières Holstein contenant 50% de primipares. Les vêlages étaient groupés entre le 27 août 2014 et le 22 octobre 2014. Les données collectées étaient disponibles pour les 60 vaches sur les 238 premiers jours de lactation. Les vaches étaient logées en bâtiment et ont toutes été alimentées avec une même ration complète durant toute l'expérimentation. La ration était offerte à volonté avec un seuil cible de 10% de refus par vache. La ration, exprimée en matière sèche, était constituée de 64,7% d'ensilage de maïs, 13,5% de concentré énergétique, 10,5% de tourteau de soja, 10% de luzerne déshydratée et de 1,3% de minéraux. Cette ration avait une densité énergétique de 0,94 UFL/kg de matière sèche (UFL est la quantité d'énergie nette pour la synthèse de lait, en sachant qu' 1 UFL de lait vaut 7,12 MJ d'énergie nette du lait, INRA (2010)) et une densité protéique de 94,3 g de PDIE/kg de matière sèche (PDIE correspond à la quantité de protéines métabolisables, INRA (2010)).

Estimation de l'efficacité alimentaire

Les quantités ingérées étaient mesurées par différence entre les quantités offertes à l'individu et les quantités refusées. Chaque vache avait sa propre auge, non partagée avec les autres vaches. La ration était distribuée une fois par jour, le matin, et les refus étaient pesés et retirés le lendemain matin avant la nouvelle distribution. Les analyses de matière sèche ont été

réalisées à partir d'échantillon de chaque aliment de la ration qui était prélevé 5 fois par semaine pour les fourrages et 1 fois par semaine pour les concentrés. La traite était réalisée deux fois par jour : à 7h30 et à 16h30. Le volume de lait produit était pesé quotidiennement et sa composition en matière grasse et protéique a été analysée deux fois par semaine à partir d'un échantillon de lait de deux traites consécutives. L'énergie nette du lait a été estimée d'après l'équation standard du besoin pour la synthèse de lait INRA (2010) :

$$EN_{\text{lait}_i} = PL \times [0,44 + 0,0055 \times (TB - 40) + 0,0033 \times (TP - 31)] \quad (1)$$

où EN_{lait} représente l'énergie nette du lait en UFL/j, PL représente le volume de lait produit en kg/j, TB représente le taux butyreux du lait en g/kg de lait et TP représente le taux protéique du lait en g/kg de lait.

Le poids vif a été mesuré après chaque traite matinale avec un système de pesée automatique. L'état corporel des vaches a été noté une fois par mois par trois experts habilités à la notation d'après la grille établie par Bazin (1984) allant de 0 pour une vache maigre à 5 pour une vache grasse, avec un pas de 0,25 point. La note d'état corporel (**NEC**) moyenne des trois experts a été extraite et utilisée pour chaque vache. Pour interpoler les données quotidiennes de cette note, les données mensuelles ont été lissées avec une spline cubique dont les nœuds étaient définis par les jours de mesure. Une différence de note d'état corporel positive entre deux jours consécutifs était définie comme un gain d'état corporel (ΔNEC^+) et à l'inverse une différence négative comme une perte d'état (ΔNEC^-).

L'efficacité alimentaire a été estimée par le REI calculé sur les 238 premiers jours de lactation en utilisant des variables moyennées ou cumulées sur cette période. Ce REI était le résidu de la régression linéaire multiple de l'énergie nette ingérée en fonction de l'énergie nette du lait, du poids vif métabolique et de la perte et du gain de réserves corporelles. La perte de réserves corporelles était estimée par le produit entre le cumul de ΔNEC^- sur les 238 premiers de lactation et le poids vif moyen et le gain de réserves corporelles était estimé par le produit entre le PV moyen et le cumul de ΔNEC^+ sur les 238 premiers jours de lactation. Cette multiplication par le PV corrige la variation de NEC des différences de gabarit existantes pour une même variation de NEC. La distinction entre perte et gain est importante parce que la une unité de NEC déposée génère plus d'énergie que l'énergie libérée quand elle est mobilisée (Chilliard *et al.*, 1987). Le modèle utilisé pour estimer le REI est donc défini comme suit :

$$ENI_i = \mu + a \times EN_{\text{lait}_i} + b \times (PV_i)^{0,75} + c \times (PV_i \times \Delta NEC^+_i) + d \times (PV_i \times \Delta NEC^-_i) + REI_i \quad (2)$$

Où ENI représente l'énergie nette ingérée en UFL/j pour la vache i ($i = 1-60$), EN_{lait}

représente l'énergie nette du lait en UFL/j pour la vache i , $PV^{0,75}$ représente le poids vif métabolique en $kg^{0,75}$ pour la vache i , ΔNEC^+ le gain de note d'état corporel sur la lactation et ΔNEC^- la perte de note d'état corporel sur la lactation, REI représente le résidu du modèle, a , b , c et d les coefficients de la régression et μ l'ordonnée à l'origine. Avec le REI, une vache est considérée comme plus efficiente que la moyenne quand elle consomme moins d'aliments que prévu, i.e. quand le REI est négatif; et à l'inverse elle est moins efficiente que la moyenne quand le REI est positif.

Estimation de l'efficacité de l'eau bue

Chaque vache était équipée d'un thermobolus ruminal, le San'Phone (Médria, Châteaubourg, France, Timsit *et al.* (2011)), durant toute la lactation. Ce thermobolus mesurait la température ruminale toutes les 5 minutes. Deux types de température étaient mesurés : la température ruminale brute et la température ruminale corrigée de l'effet boisson (Figure 1). La température brute chute à chaque boisson. La température corrigée proposée par Médria corrige de l'effet boisson de telle sorte que la température corrigée reflète la température corporelle. Cette variable a été calculée pour chaque vache et par jour, puis moyennée par vache sur la lactation et appelée **Ecart_temp**. Nous avons supposé que la cumul sur la journée de la différence entre la température brute et corrigée était un bon proxy de l'eau bue par la vache (Bewley *et al.*, 2008). A cet effet, la variable Ecart_temp a été utilisée comme proxy de la quantité d'eau bue.

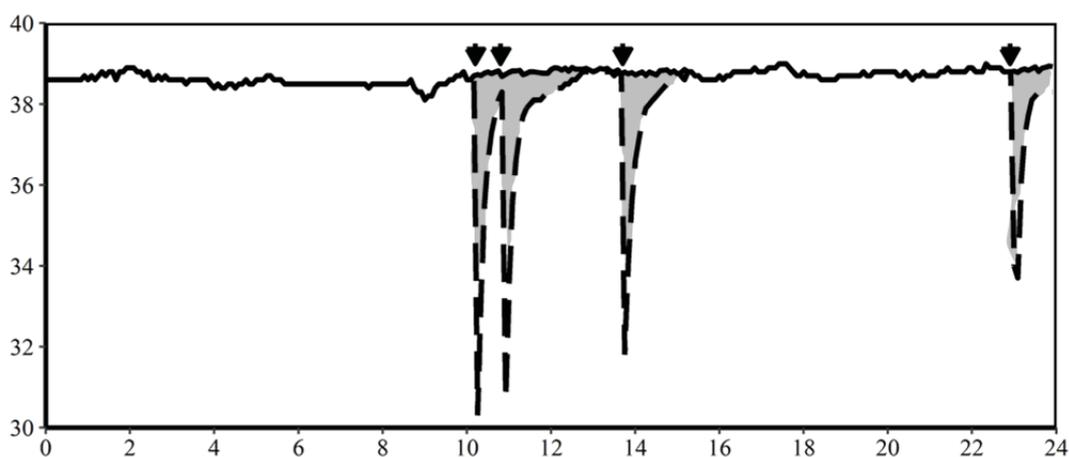


Figure 1 Exemple d'une cinétique journalière pour une vache en lactation de la température ruminale brute (— —) et de la température ruminale corrigée de l'effet boisson (——). Chaque boisson est repérée par une chute de la température ruminale (\blacktriangledown). La surface grisée correspond à la variable Ecart_temp.

L'efficacité de l'eau bue a été estimée par l'eau bue résiduelle (**EBR**) comme le résidu de la régression linéaire (modèle 3) de l'eau bue, estimée par Ecart_temp, en fonction des variables moyennées sur la lactation pour le volume de lait produit par jour et le poids vif. Ces deux variables constituent les variables utilisées dans les modèles de prédiction de l'eau bue par la vache intra-régime (Khelil-Arfa *et al.*, 2012).

$$\text{Ecart_temp}_j = \mu + a \times \text{PL}_j + b \times \text{PV}_j + \text{EBR}_j \quad (3)$$

où Ecart_temp_i est la moyenne sur la lactation du cumul journalier de la différence de la température ruminale corrigée et brute pour la vache *i* (*i*= 1-60) en °C/j, PL_i est la moyenne sur la lactation du volume de lait produit en kg/j pour la vache *i*, PV_i est la moyenne sur la lactation du poids vif en kg de la vache *i*, EBR est le résidu du modèle en °C/j, *a* et *b* les coefficients de la régression et μ l'ordonnée à l'origine. Avec l'EBR, une vache est considérée comme plus efficace que la moyenne quand elle boit moins d'eau que prévu, i.e. quand EBR est négatif ; et à l'inverse elle est moins efficace que la moyenne quand l'EBR est positif.

Analyses statistiques

L'ensemble des régressions linéaires ont été réalisées avec la fonction lm de R Core Team (2016). Chacun des deux indicateurs, EBR et Ecart_temp, a été comparé au REI, d'une part par l'estimation du coefficient de corrélation de Pearson et d'autre part en réalisant une régression linéaire entre le REI et l'indicateur. Par ailleurs, les 10% de vaches les plus et les 10% de vaches les moins efficaces ont été identifiées d'après l'EBR, d'après Ecart_temp et d'après le REI pour évaluer la capacité de l'EBR et Ecart_temp à identifier les extrêmes.

Résultats et discussion

La variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire estimée par le REI ne représente que 6,4% de la variabilité interindividuelle de l'énergie nette ingérée. Le coefficient de variation du REI, obtenu pour la présente étude, est proche des références basses de la bibliographie avec 3,1% de la moyenne de l'énergie nette ingérée (Tableau 1) alors que dans la bibliographie ce coefficient de variation varie de 2,9% (Xi *et al.*, 2016) à 13% (Hurley *et al.*, 2016). Les 10% de vaches les plus efficaces consomment en moyenne 1,1 UFL en moins chaque jour par rapport à la consommation moyenne du troupeau et les 10% les moins efficaces consomment 1,1 UFL en plus chaque jour par rapport à la consommation moyenne du troupeau (Tableau 2). L'efficacité de l'eau bue est plus variable que le REI avec un coefficient de variation égal à 8,2% de la moyenne de Ecart_temp.

Tableau 1 Moyenne, coefficient de variation (CV), minimum et maximum des variables moyennées sur la lactation (60 vaches Holstein sur les 238 premiers jours de lactation).

Variables ¹	Moyenne	CV (%)	Min	Max
ENI (UFL/j)	20,2	12,4	15,6	25,6
ENlait (UFL/j)	13,1	13,1	10,0	17,2
PL (kg/j)	30,7	15,7	23,4	43,4
MGlait (g/j)	1 147	17,2	813	1 568
MP lait (g/j)	947	14,3	754	1 282
PV ^{0,75} (kg ^{0,75})	125	8,3	103	147
ΔNEC ⁻	0,4	55,0	0,0	0,9
ΔNEC ⁺	0,7	44,3	0,3	2,0
REI (UFL/j)	0,0	3,1 ¹	-1,5	1,5

¹ENI = énergie nette ingérée energy; ENlait = énergie nette du lait; PL = production laitière ; MGlait = matière grasse du lait ; MPLait = matière protéique du lait; REI = residual energy intake; NEC= note d'état corporel, notée de 0 pour une vache maigre à 5 pour une vache grasse avec un pas de 0,25 unité; ΔNEC⁻ = cumul sur les 238 premiers jours de lactation de la perte quotidienne de NEC; ΔNEC⁺ = cumul sur la lactation du gain quotidien de NEC.

¹ CV du REI a été calculé comme le rapport entre l'écart-type du REI et la moyenne d'ENI car les REI sont centrés sur 0.

La relation entre les deux indicateurs proposés et le REI est positive et significative avec une corrélation de 0,34 entre le REI et Ecart_temp (Figure 2A) et de 0,38 entre le REI et l'EBR (Figure 2B). Une forte part de la variabilité du REI reste cependant inexplicée, avec des écarts-type résiduels de la régression du REI en fonction de Ecart_temp de 0,59 UFL/j et en fonction de l'EBR de 0,58 UFL/j.

L'utilisation de l'EBR ou de Ecart_temp comme proxy est surtout intéressante pour identifier les vaches les plus efficaces. Les 10% de vaches les plus efficaces d'après le REI sont des vaches qui ont un EBR et un Ecart_temp significativement différents des deux autres groupes d'efficacité (Tableau 2). Par contre les 10% de vaches les moins efficaces et le reste du troupeau ne sont pas significativement différents pour l'EBR et pour Ecart_temp (Tableau 2). Les deux indicateurs, EBR et Ecart_temp, sont aussi performants l'un que l'autre pour identifier les 10% extrêmes du REI (Tableau 3). Sur les 10% de vaches les plus efficaces d'après Ecart_temp ou l'EBR, 50% sont effectivement efficaces d'après le REI et les 50% restants sont en fait dans le groupe médium du REI (Tableau 3). A l'inverse, sur les 10% de vaches les plus inefficaces d'après le REI, aucune n'a été identifiée par les deux indicateurs : elles font partie du groupe médium de l'EBR ou de Ecart_temp. De la même manière, les 10% de vaches les plus inefficaces d'après l'EBR ou d'après Ecart_temp sont dans le groupe médium d'après le REI. Les 10% de vaches les plus efficaces d'après l'EBR sont des vaches

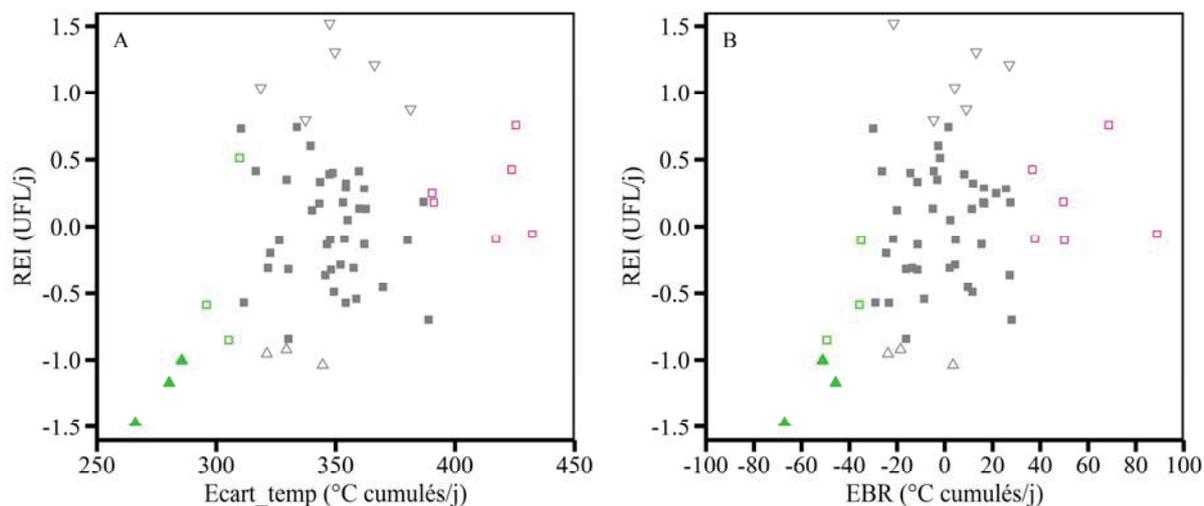


Figure 2 Relation entre l'efficacité alimentaire estimée par le résiduel energy intake (REI) et A : le cumul des écarts quotidiens entre la température ruminale corrigée de l'effet boisson et la température ruminale brute (Ecart_temp) ; B : l'eau bue résiduelle (EBR) estimée comme le résidu de la régression linéaire de Ecart_temp en fonction du volume de lait produit et du poids vif. Le REI est le résidu de la prédiction de l'énergie nette ingérée par les dépenses pour la synthèse de lait, l'entretien et la perte et le gain de réserves corporelles. Les groupes extrêmes sont identifiés sur les deux graphiques avec les 10% les plus efficaces, les 10% les moins efficaces et le reste par la forme pour le REI (Δ pour les efficaces, ∇ pour les inefficaces et \square pour le reste) et par la couleur pour l'EBR (vert pour les efficaces, rose pour les inefficaces et gris pour le reste). Les vaches classées dans la même catégorie pour l'EBR et le REI et pour le REI et Ecart_temp sont symbolisées par une forme pleine.

qui ont un REI significativement plus négatif que les autres vaches, avec un REI moyen à -0,9 UFL/j, proche du REI des vaches efficaces d'après le REI (Tableau 2). Les deux autres groupes, medium et inefficaces d'après l'EBR, ne diffèrent pas pour le REI, avec un REI moyen de 0,1 UFL/j pour le groupe medium et 0,2 UFL/j pour les 10% les moins efficaces d'après l'EBR (Tableau 2). Ces résultats montrent que les deux indicateurs sont particulièrement intéressants pour identifier les vaches les plus efficaces, notamment dans un contexte de sélection génétique sur l'efficacité alimentaire. Par contre l'incapacité des deux indicateurs à identifier les vaches inefficaces pose la question de l'interprétation biologique des différences interindividuelles de Ecart_temp. L'hypothèse formulée était que Ecart_temp reflète les quantités d'eau bue par la vache. Cependant, les résultats suggèrent que Ecart_temp combine plusieurs caractères biologiques non corrélés entre eux. La variabilité interindividuelle de la température ruminale peut aussi refléter des différences interindividuelles de volume de rumen ou de vitesse de transit. Une meilleure compréhension de la variabilité interindividuelle de Ecart_temp permettrait d'affiner la définition du proxy

EBR ou Ecart_temp et potentiellement d'améliorer la prédiction du REI par ces deux indicateurs.

Conclusion

L'identification des vaches les plus efficaces semble possible grâce au monitoring de la température ruminale, sans mesurer les quantités ingérées individuelles. L'indicateur indirect utilisé est construit pour une même ration alimentaire à partir de la température ruminale, du poids vif et de la production laitière, qui demain seront accessibles en élevage commercial. Cependant, une validation externe est nécessaire pour confirmer et surtout prouver le concept de la méthode, à la fois en validant sur un effectif plus important et avec d'autres types de ration. L'incapacité des indicateurs proposés à identifier les vaches inefficaces suggère que la variation de température ruminale n'est pas uniquement le reflet des quantités d'eau bue, mais probablement la combinaison de différentes composantes, telles que des caractéristiques digestives interindividuelles. La caractérisation plus fine des variations de température ruminale, en fonction de la boisson et des caractéristiques digestives des vaches, permettrait d'affiner l'interprétation des variations de température ruminale et potentiellement d'améliorer la prédiction de l'efficacité alimentaire par cette nouvelle source d'information.

Tableau 2 Comparaison des 10% de vaches efficaces (Eff., 6 vaches), 10% de vaches inefficaces (Ineff., 6 vaches) et du reste (Medium, 48 vaches) d'après le residual energy intake (REI) et d'après l'eau bue résiduelle (EBR) pour la valeur moyenne sur la lactation de l'énergie nette ingérée (ENI) et les potentiels déterminants de l'efficacité alimentaire.

Variables ¹	Groupes REI				Groupes EBR			
	Eff.	Medium	Ineff.	P ²	Eff.	Medium	Ineff.	P ²
ENI (UFL/j)	18,2 ^a	20,3 ^{ab}	21,8 ^b	0,035	20,4	20,0	21,6	0,33
ENlait (UFL/j)	12,1	13,2	13,2	0,438	13,7	12,9	13,8	0,37
PL (kg/j)	28,1	31,1	31,0	0,379	30,4	30,4	33,4	0,26
MGlait (g/j)	1066	1156	1155	0,581	1257	1130	1174	0,32
MP lait (g/j)	879	953	961	0,438	970	932	1039	0,20
PV ^{0,75} (kg ^{0,75})	123	124	128	0,703	131	123	131	0,07
ΔNEC ⁻	0,4	0,4	0,4	0,992	0,4	0,4	0,5	0,7
ΔNEC ⁺	0,8	0,7	0,9	0,354	0,7	0,7	0,9	0,36
REI (UFL/j)	-1,1 ^a	0,0 ^b	1,1 ^c	7 10 ⁻¹³	-0,9 ^a	0,1 ^b	0,2 ^b	0,001
EBR (°C/j)	-33,8 ^a	3,7 ^b	4,5 ^c	0,007	-47,4 ^a	-1,0 ^b	55,2 ^c	3 10 ⁻¹⁴
Ecart_temp (°C/j)	304 ^a	350 ^b	353 ^b	0,002	293 ^a	347 ^b	411 ^c	2 10 ⁻¹³

a-c Les moyennes d'une même ligne avec des lettres différentes diffèrent à (P < 0,05)

1 ENI = énergie nette ingérée energy; ENlait = énergie nette du lait; PL = production laitière ; MGlait = matière grasse du lait ; MPlait = matière protéique du lait; REI = residual energy intake; NEC= note d'état corporel, notée de 0 pour une vache maigre à 5 pour une vache grasse avec un pas de 0,25 unité; ΔNEC⁻ = cumul sur les 238 premiers jours de lactation de la perte quotidienne de NEC; ΔNEC⁺ = cumul sur la lactation du gain quotidien de NEC ; EBR = eau bue résiduelle ; Ecart_temp = cumul quotidien de l'écart entre le température ruminale corrigée de l'effet boisson et de la température ruminale brute.

2 Probabilité critique issue de l'analyse de variance avec les 3 groupes comme cofacteur.

Tableau 3 Tableau croisé du nombre de vaches identifiées comme les 10% les plus efficaces (Eff.), 10% les moins efficaces (Ineff.) et le reste du troupeau (Medium) d'après le residual energy intake (REI), utilisé comme référence, et d'après deux indicateurs : l'eau bue résiduelle (EBR) et Ecart_temp.

		REI ¹			
		Eff.	Medium	Ineff.	Total
Ecart_temp ou EBR ²	Eff.	3	3	0	6
	Medium	3	39	6	48
	Ineff.	0	6	0	6
<i>Total</i>		<i>6</i>	<i>48</i>	<i>6</i>	<i>60</i>

¹ LE REI est le résidu de la prédiction de l'énergie nette ingérée par les dépenses pour la synthèse de lait, l'entretien et la perte et le gain de réserves corporelles.

² Ecart_temp = moyenne lactation du cumul quotidien de l'écart entre la température ruminale corrigée de l'effet boisson et de la température ruminale brute. EBR = résidu de la régression linéaire de Ecart_temp en fonction de la moyenne lactation de la production laitière et du poids vif.

References

- Bazin S 1984. Grille de notation de l'état d'engraissement des vaches Pie Noires. Institut technique de l'élevage bovin, Paris, France.
- Berry DP and Crowley JJ 2013. CELL BIOLOGY SYMPOSIUM: Genetics of feed efficiency in dairy and beef cattle. *Journal of Animal Science* 91, 1594-1613.
- Bewley JM, Grott MW, Einstein ME and Schutz MM 2008. Impact of intake water temperatures on reticular temperatures of lactating dairy cows. *Journal of dairy science* 91, 3880-3887.
- Bordas A, Obeidah A and Mérat P 1978. On the heredity of water intake and feed efficiency in the Fowl. *Annales de Génétique et de Sélection Animale* 10, 233-250.
- Chilliard Y, Rémond B, Agabriel J, Robelin J and Verite R 1987. Variations du contenu digestif et des réserves corporelles au cours du cycle gestation-lactation. *Bulletin Technique C.R.Z.V. de Theix* 70, 117-131.
- Hurley AM, López-Villalobos N, McParland S, Kennedy E, Lewis E, O'Donovan M, Burke JL and Berry DP 2016. Inter-relationships among alternative definitions of feed efficiency in grazing lactating dairy cows. *Journal of dairy science* 99, 468-479.
- Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) 2010. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeurs des aliments: tables Inra 2007 mise à jour 2010. Quae, Versailles, France.
- Khelil-Arfa H, Boudon A, Maxin G and Faverdin P 2012. Prediction of water intake and excretion flows in Holstein dairy cows under thermoneutral conditions. *Animal* 6, 1662-1676.
- R Core Team 2016. R: A language and environment for statistical computing. In R foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Renaudeau D, Frances G, Dubois S, Gilbert H and Noblet J 2013. Effect of thermal heat stress on energy utilization in two lines of pigs divergently selected for residual feed intake¹². *Journal of Animal Science* 91, 1162-1175.
- Timsit E, Assié S, Quiniou R, Seegers H and Bareille N 2011. Early detection of bovine respiratory disease in young bulls using reticulo-rumen temperature boluses. *The Veterinary Journal* 190, 136-142.
- Veerkamp RF, De Haas Y, Pryce JE, Coffey MP, Spurlock DM and Vandehaar MJ 2015. Guidelines to measure individual feed intake of dairy cows for genomic and genetic evaluations. In *Proceedings of the ICAR Technical Meeting, 10-12/06/2015, Krakow, Poland*, pp. 191-198.
- Xi YM, Wu F, Zhao DQ, Yang Z, Li L, Han ZY and Wang GL 2016. Biological mechanisms related to differences in residual feed intake in dairy cows. *Animal* 10, 1311-1318.

Chapitre 7

Discussion générale

Les chapitres précédents ont d'une part permis d'améliorer l'estimation de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire estimée par le REI (Chapitres 3 et 4) et d'autre part, d'identifier des mécanismes biologiques associés à la variabilité du REI (Chapitre 5). Le chapitre précédent a abordé la question de la difficulté de mesure des quantités ingérées, nécessaires pour estimer l'efficacité alimentaire. A cet effet le chapitre 6 a présenté un indicateur indirect du REI mesurable à haut débit et en ferme commerciale pour identifier les vaches les plus efficaces. L'ensemble de ces 4 chapitres a donc permis de répondre aux cinq questions de recherche posées dans le chapitre 3.

L'objectif de cette partie est de discuter l'ensemble des chapitres précédents, du point de vue de la méthodologie choisie, mais aussi de la généralisation des résultats obtenus. A cet effet, la discussion est organisée en trois parties.

La première partie aborde la méthodologie du REI pour estimer la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire chez la vache laitière. Les résultats obtenus dans ce projet sont tous basés sur la même méthodologie pour estimer le REI. L'objectif est ici de discuter le choix de la méthodologie employée et notamment l'influence du choix des méthodes et de la pression de mesures sur la variabilité du REI.

La seconde partie discute la définition de l'efficacité alimentaire du point de vue du choix des variables à prendre en compte dans son estimation ou au contraire à conserver dans les déterminants potentiels de l'efficacité alimentaire. Les mécanismes identifiés dans le chapitre 5 ne sont valables que pour la définition de l'efficacité alimentaire choisie dans le présent projet. Le choix des mécanismes pris en compte pour estimer le REI est important car ces mécanismes ne seront, par définition, plus des déterminants de l'efficacité alimentaire. Chacun des mécanismes dont la variabilité est associée à la variabilité des quantités ingérées sera donc abordé séparément et discuté comme produit de base du modèle ou déterminant potentiel.

La dernière partie aborde la question de la mise en application sur le terrain des résultats obtenus. Parmi les questions posées figurent notamment la question du choix de l'indicateur à utiliser entre ratio et REI, du développement d'une alternative à la mesure des quantités ingérées pour estimer l'efficacité alimentaire et du choix d'une période de mesure restreinte de la vie ou de la lactation de la vache.

I. La méthodologie du residual energy intake pour estimer la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire

L'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de ce projet de thèse (Chapitres 3 à 6) a été obtenu avec la même méthodologie de calcul du REI. Le REI était défini comme le résidu de la régression linéaire de l'énergie nette ingérée prédite par les dépenses ou les apports associés à la synthèse de lait, l'entretien, la perte et le gain de réserves corporelles. Les résultats obtenus sont donc valides pour cette définition du REI et dans les conditions expérimentales choisies. La synthèse bibliographique (Chapitre 1) a mis en avant la sensibilité de la variabilité du REI à la définition choisie, aussi bien en termes de variables prises en compte dans le modèle, que de méthodes de mesure et de définition de la période de mesure du REI. L'objectif de cette première partie de la discussion est d'analyser la validité de nos résultats, en discutant de l'effet du choix des méthodes et fréquences de mesure et du choix des variables prises en compte dans l'estimation du REI.

a. Faible variabilité interindividuelle du REI obtenue, grâce notamment à la qualité et précision des mesures réalisées

i. Une faible variabilité du REI observée quand les conditions expérimentales sont contrôlées et stables

La variabilité interindividuelle du REI obtenue dans ce travail ne représentait que 8% de la variabilité interindividuelle de l'énergie nette ingérée observée sur le troupeau rassemblant les deux installations expérimentales (Chapitre 4) et 6,4% sur le troupeau de Méjusseume (Chapitre 5). Cette variabilité est faible comparée à celle recensée dans la bibliographie qui représente de 10 à 41% de la variabilité des QI mesurées (Tableau 1). A l'inverse de la plupart des travaux réalisés chez la vache laitière (Tableau 1), les conditions expérimentales ont été stabilisées au maximum dans ce projet, à la fois avec l'utilisation d'une ration constante, ce qui n'est pas une pratique courante pour les vaches laitières, et avec un logement à l'intérieur tout au long de la lactation. Cette constance de la ration tout au long de la lactation est essentielle pour ne pas introduire une source de variation potentielle supplémentaire dans la variabilité de l'efficacité alimentaire. Le modèle statistique considère que la ration a les mêmes valeurs énergétique et protéique pour tous les individus et à tous les stades de lactation. Des rations composées majoritairement de fourrages ont une valeur énergétique qui évolue au cours du temps. Pour ces rations, l'utilisation des kg de MS pour les QI introduit donc un biais dans l'estimation du REI. Les études sur l'effet du changement de ration sur

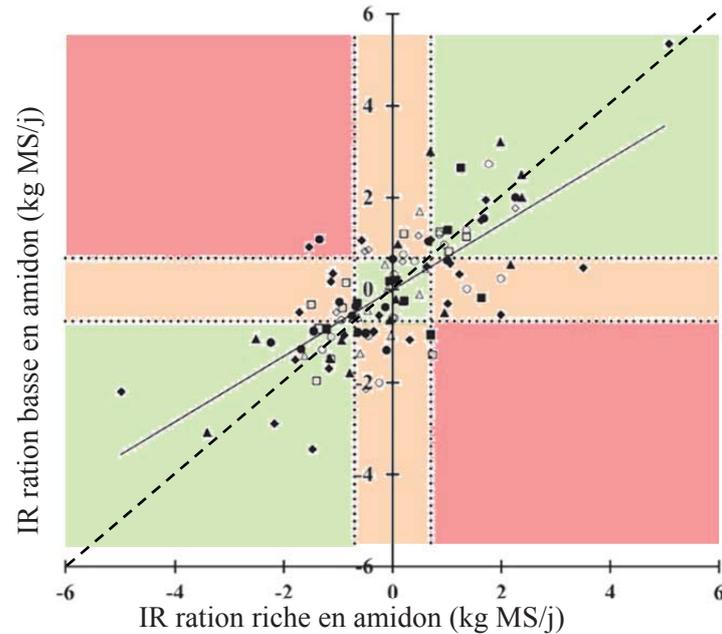


Figure 1 Relation entre l'ingéré résiduel (IR) quand les vaches ($n = 109$) sont alimentées avec une ration riche ou pauvre en amidon (issu de Potts *et al.*, 2015). Le jeu de données rassemble 4 expérimentations différentes (\blacklozenge , \blacksquare , \blacktriangle , \bullet) et des vaches primipares (formes ouvertes) et multipares (formes pleines). Les lignes pointillées représentent $\pm 0,5$ écart-type de l'IR pour les deux rations et la ligne en tiret (- - -) représente la première bissectrice. Les vaches classées dans le même groupe d'efficacité sont dans les zones vertes, celles qui ont juste changé d'un classement sont dans les zones oranges et celles qui sont passées dans le groupe opposé sont dans les zones rouges.

l'efficacité alimentaire de la vache laitière restent rares. Le changement de ration, comme par exemple lors d'une augmentation de la teneur en amidon donne des IR positivement corrélés ($r = 0,73$ dans Potts *et al.* (2015) et $r = 0,79$ dans Burczynski *et al.* (2013)). Cette corrélation modérée cache notamment une forte variabilité de la relation entre les IR estimés pour les deux rations, avec notamment 4 vaches qui changent d'extrême : 2 deviennent efficaces alors qu'elles étaient inefficaces et 2 deviennent inefficaces alors qu'elles étaient efficaces sur la ration riche en amidon (Figure 1). Cette forte variabilité suggère que toutes les vaches ne réagissent pas de la même manière à un changement de ration. L'effet ration semble donc difficile à comptabiliser dans l'estimation de l'efficacité alimentaire. La simple prise en compte d'un effet ration ou du stade de lactation dans le modèle, tel que réalisé dans de nombreuses études combinant des bases de données avec des régimes différents (Vallimont *et al.*, 2011, Tempelman *et al.*, 2015, Hurley *et al.*, 2016), ne suffit probablement pas à corriger l'effet du changement de la ration et rend donc la généralisation de l'estimation par l'IR compliquée. L'utilisation de l'effet stade est de plus assez risquée car sa variabilité peut

Tableau 1 Description des modèles utilisés chez la vache laitière dans la bibliographie pour estimer l'efficacité alimentaire d'après : les méthodes de mesure des quantités ingérées (QI), les produits, les facteurs fixes du modèle, la ration et sa constance au cours de l'expérimentation, la durée de la période de lactation étudiée, la nature du modèle et le coefficient de détermination du modèle (R²).

Ref. ¹	QI	Produits			Ration			Période (JdL)	Type	R ²
		Lait	Entretien	Reserves corporelles: Etat Variations	Autres	Facteur	Type			
1	EM	PL, MG, MP, lactose	PV	ΔPV		2 TMR	oui	1-182	Reg.	ND
1	EM	EM	EM			2 TMR	oui	1-182	Syst. Alim	NA
2	MS	MG, MP, lactose	PVM	ΔPV - ΔPV+	année	pât.+conc.	non	16-288	Reg.	0,86
3	MS	PL, MG, MP	PV	ΔNEC - ΔNEC+	stade lactation	MR+conc.	non	305	Reg.	0,73
4	EM	EM lait	PV	ΔPV - ΔPV+		MR+conc.	non	1-210	Reg.	0,90
4	EM	EM lait	EM			MR+conc.	non	1-210	Syst. Alim	NA
5	EM	PL corrigée MG		ΔPV	parité	TMR	oui	1-90	Reg.	0,72
6	EN	EN	PVM	ΔPVV		3 TMR	non	5-305	Reg.	0,68
7	MS	PL, MG, MP, lactose	PVM	ΔPV		pât+conc	non	(61/191)+32	Reg.	0,43
8	MS	PL, MG, MP, lactose	PVM	<u>NEC</u> ΔPV		pât+conc	non	35	Reg.	0,60
8	MS	PL, MG, MP, lactose	PVM	<u>NEC</u> ΔPV		pât+conc	non	35	Syst. Alim	NA
9	MS	EN	PVM	ΔPV	parité, stade lactation, ration, expérience	185 rations	oui	50-200	Reg.	ND
10	EN	EN	PVM	ΔPVV		3 TMR	non	5-305	Reg.	0,73
11	EN	EN	PVM	<u>NEC</u> ΔPV - ΔPV+ ΔNEC - ΔNEC+	parité stade lactation	pât.+conc.	non	1-305	Reg.	0,59
12	MS	PL corrigée MG	PVM	ΔPV	âge stade lactation	TMR	oui	ND	Reg.	0,85
13	MS	EN	PVM		parité, stade lactation, troupeau, année, saison vêlage	185 rations	oui	50-200	Reg.	ND
14	EN	EN	PVM	ΔNEC - ΔNEC+		1 TMR	oui	1-238	Reg.	0,92

¹ 1 = Veerkamp *et al.* (1995); 2 = Coleman *et al.* (2010); 3 = Vallimont *et al.* (2011); 4 = Mantysaari *et al.* (2012); 5 = Connor *et al.* (2013); 6 = Manafiazar *et al.* (2013); 7 = Davis *et al.* (2014); 8 = Macdonald *et al.* (2014); 9 = Tempelman *et al.* (2015); 10 = Manafiazar *et al.* (2016); 11 = Hurley *et al.* (2016); 12 = Xi *et al.* (2016); 13 = Yao *et al.* (2017); 14 = Fischer *et al.* (2017). NA = non adapté; ND = pas de données renseignées; Reg. = modèle de régression linéaire; EN = énergie nette; EM = énergie métabolisable; MS = matière sèche; PL = production laitière; MP = matière protéique du lait; MG = matière grasse du lait; PV = poids vif; NEC = note d'état corporel; = perte de PV; gain de PV; gain de NEC; gain de NEC; TMR = ration complète; MR = ration semi-complète; conc. = concentrés; pât. = pâturage; Syst. Alim. = système alimentaire; JdL = jour de lactation.

provenir de sources différentes à la fois au cours du temps et entre individus, rendant donc les IR ininterprétables.

Les résultats du chapitre 4 ont montré que la part associée à l'effet animal ne représentait que 59% de la variabilité du REI, i.e. que 4,7% de la variabilité de l'énergie nette ingérée. Les 41% restants sont supposés assimilés à la variabilité de l'énergie nette ingérée non associée à l'effet animal mais plutôt aux erreurs de mesure des variables et d'ajustement du modèle. Cependant, cette interprétation de la part individuelle du REI n'est correcte que sous la condition que l'effet aléatoire associé à l'animal n'est que biologique et non associé à de l'erreur de mesure spécifique à un individu ; et que le résidu restant dans le modèle n'inclut que de l'erreur de mesure ou d'ajustement du modèle. Il existe certaines conditions pour lesquelles cette hypothèse n'est pas vérifiée. Une vache qui trierait systématiquement les concentrés dans l'auge tirant un meilleur parti de la ration ou qui arrive à voler la ration d'une autre vache sont deux exemples d'erreurs de mesure systématiques incluses dans l'effet individu et non dans l'erreur du modèle. Le cas de figure du vol illustre l'effet majeur potentiel des pannes, si elles sont récurrentes, non référencées et corrigées rapidement, ce qui n'a pas été le cas dans les stations expérimentales de la présente étude. Mais dans la plupart des cas, les erreurs de mesure ne sont pas spécifiques à un individu et viennent accroître l'erreur globale du modèle, donc le REI.

ii. Une variabilité interindividuelle du REI qui est sensible aux méthodes de mesure utilisées

Comme le REI est le résidu d'un modèle statistique, sa variabilité inclut également toutes les erreurs de mesure et d'ajustement du modèle. La synthèse bibliographique de la méthodologie des essais sur l'efficacité alimentaire (Chapitre 1) a montré une forte variabilité à la fois des méthodes de mesure utilisées pour caractériser un même phénotype et des fréquences de ces mesures (Tableau 2).

Influence de la fréquence des mesures.

Pour minimiser la part de la variabilité interindividuelle potentiellement associée aux erreurs de mesure, le présent travail a cherché à maximiser la pression des mesures réalisées individuellement, dans la limite des capacités des installations expérimentales. Pour les QI, le PV et l'énergie nette du lait, les mesures ont été réalisées à haut débit avec des mesures directes. La mesure des QI individuelles est une différence majeure entre travaux (Tableau 2),

notamment entre les travaux ayant une faible ou forte variabilité (Hurley *et al.*, 2016) pour le REI. Cette comparaison inter-études met en avant une relation négative entre la fréquence de mesures des QI et des variables indépendantes du calcul de l'efficience alimentaire et la variabilité interindividuelle du REI ramené à la moyenne des QI (Tableau 2). La NEC, quand elle est réalisée manuellement, est trop subjective pour être mesurée plus fréquemment qu'une fois toutes les 2 semaines. De plus, l'œil humain n'est pas assez sensible pour détecter de faibles variations de NEC, telles que celles apparaissant à court terme.

Tableau 2 Comparaison des fréquences et méthodes de mesure utilisées pour mesurer les quantités ingérées (QI) et les différentes dépenses prises en compte pour calculer l'ingéré résiduel (IR), ainsi que le coefficient de variation (CV) de l'IR, le coefficient de détermination (R²) du modèle, le type de ration et la durée de la période de mesure.

Ref. ¹	QI		Produits			CV		Ration	Durée (j)
	Fréq.	méthode	PV	NEC	Lait	IR ²	R ²		
1	1/j	offert-refus	1/s		1/s	2,9	0,85	TMR	ND
2	1/j	auge peseuse	3/s	1/s	3/s	5,5	0,60	TMR	35
3	1/j	offert-refus	1/s		1/m	6,0	0,84	TMR	150
4	1/j	offert-refus	1/m		1/m	7,0	0,68	TMR	301
5	1/j	auge peseuse	1/2s		1/s	7,5	0,72	TMR	90
6	1/j	offert-refus	1/s-1/m	1/s	1/s-1/m	9,4	0,90	TMR	210
7	4,5/lac.	indirecte: alcane	1/s	1/18j	1/s	13	0,59	pâturage	305
8	1/j	offert-refus	7/s	1-2/m	2/s	3,8	0,92	TMR	238

¹1 = Xi *et al.* (2016); 2= Macdonald *et al.* (2014); 3 = Yao *et al.* (2013); 4 = Manafiazar *et al.* (2013); 5 = Connor *et al.* (2013); 6 = Mantysaari *et al.* (2012); 7 = Hurley *et al.* (2016); 8 = Fischer *et al.* (2017).

²coefficient de variation calculé comme le rapport entre l'écart-type de l'IR et la moyenne des QI, car la moyenne des REI est par définition nulle.

TMR = ration complète ; MR = ration semi-complète ; C = concentrés ; ND = absence de données ; j = jour ; s = semaine ; m = mois ; lac. = lactation.

Pour vérifier cette hypothèse sur le lien entre fréquence de mesures des variables du modèle et variabilité interindividuelle du REI, nous avons étudié l'influence d'une réduction des fréquences de mesure des variables sur la variabilité du REI dans notre jeu de données. Chacune des variables du modèle a été recalculée en utilisant différentes fréquences, allant d'une fois par jour à une fois tous les deux mois pour les QI et deux fois par semaine à une fois tous les deux mois pour le PV et l'énergie nette du lait. Les variables du modèle ont ensuite été recalculées en moyenne par vache sur la lactation et la régression linéaire a été ajustée pour ré-estimer le REI. Les résultats montrent que la variabilité interindividuelle du REI, exprimée par l'écart-type, est d'autant plus forte que la fréquence de mesure des QI et

des variables indépendantes est faible (Figure 2). La variabilité du REI apparaît beaucoup plus sensible à la fréquence de mesures des QI que les autres variables du modèle. En effet, l'augmentation de l'écart-type du REI est beaucoup plus importante quand la fréquence diminue sur les QI par rapport aux variables indépendantes. Le REI présente un écart-type maximal de 1,5 UFL/j dans le cas des QI mesurées à faible fréquence et seulement de 0,83 UFL/j dans le cas des autres variables pour la fréquence minimale testée. Cette augmentation de variabilité est d'autant plus inquiétante que la corrélation du REI obtenu avec ces fréquences et le REI obtenu avec la fréquence maximale diminue quand la fréquence des mesures diminue, et ce d'autant plus pour les QI (Figure 2).

Dans les conditions expérimentales très stables que nous avons réalisées, une fréquence d'au moins deux mesures par semaine des QI semble nécessaire pour ne pas trop influencer l'écart-type du REI et la corrélation du REI obtenu avec le REI de référence obtenu avec la fréquence maximale (Figure 2). De la même manière, une fréquence d'*a minima* une fois toutes les deux semaines semble suffisante pour le PV et l'énergie nette du lait (Figure 2). Les études réalisées au pâturage qui ne peuvent avoir que de faibles fréquences de mesure des QI, de l'ordre d'une fois tous les deux mois (Hurley *et al.*, 2016), ont donc un REI difficilement comparable avec le REI obtenu avec une pression de mesure plus grande des QI. Ceci est d'autant plus vrai que les conditions expérimentales au pâturage peuvent varier de façon importante. Les différences de variabilité du REI obtenues dans les autres études peuvent donc s'expliquer par les différences de fréquence de mesure des variables explicatives du modèle, avec le coefficient de variation le plus faible obtenu avec une fréquence hebdomadaire (Xi *et al.*, 2016) et le plus élevé avec une fréquence mensuelle (Mantysaari *et al.*, 2012).

Influence de la méthode de mesure.

Les études dans la bibliographie se différencient également sur le choix des méthodes de mesure utilisées pour mesurer un même phénotype, que ça soit pour les QI (Tableau 2) ou les variations de réserves corporelles (Tableau 1). Le choix de la méthode pour mesurer les QI individuelles influence également fortement la variabilité du REI (Tableau 2). Le coefficient de variation le plus fort a été obtenu pour la seule étude réalisée au pâturage avec des mesures indirectes des QI (Hurley *et al.*, 2016). Les méthodes indirectes passant par l'estimation des QI par dosage de marqueurs indigestibles tels que les alcanes ne sont pas assez précises pour mesurer des différences interindividuelles de QI (Pérez-Ramírez *et al.*, 2012). En considérant que le pâturage est le fourrage le moins cher (Dillon, 2006, Crozat *et al.*, 2009,

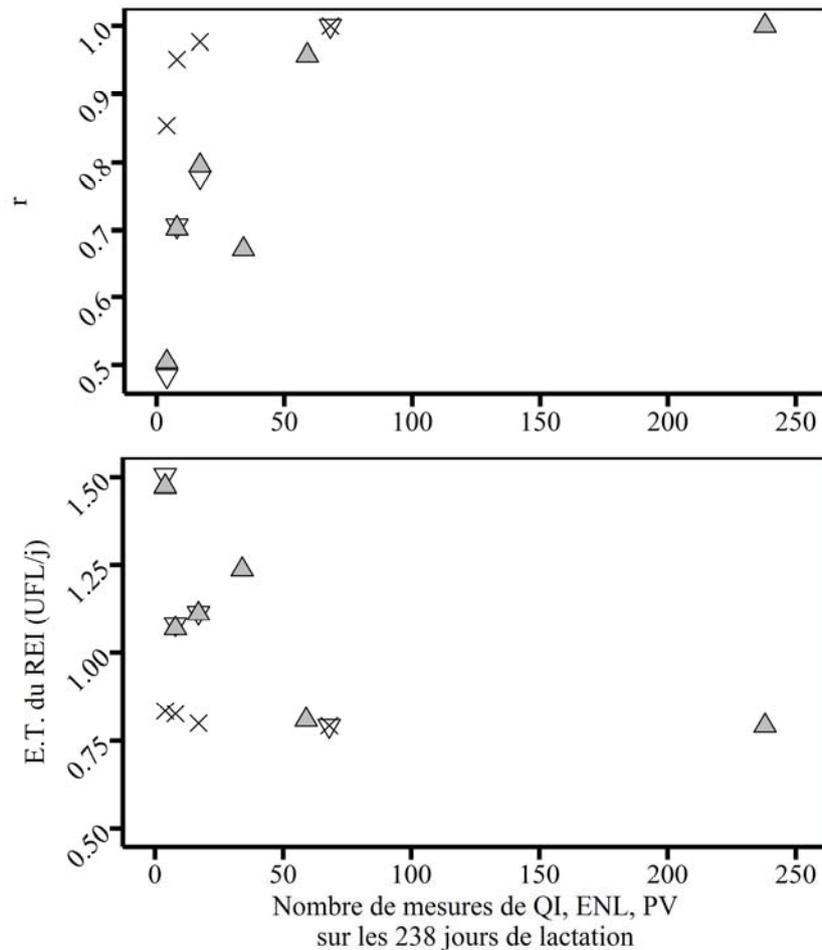


Figure 2 Influence du nombre de mesures réalisées pour les matières sèches ingérées (QI, Δ) ou le poids vif (PV) et l'énergie nette du lait (ENL, \times) ou les trois variables en même temps (∇) au cours des 238 jours de lactation sur l'écart-type (E.T.) de l'ingéré résiduel (REI) obtenu et sur le coefficient de corrélation (r) entre le REI obtenu aux différentes fréquences et le REI de référence calculé avec la fréquence maximale.

Finneran *et al.*, 2012), l'intérêt du gain d'efficacité alimentaire par animal est sans doute un peu moins justifié que dans des systèmes utilisant d'autres fourrages et des concentrés. L'herbe peut plutôt être vue comme une ressource à valoriser prioritairement, notamment en raison de ces bénéfices environnementaux, de son coût réduit et de son absence de compétition avec l'alimentation humaine, autre que par les surfaces utilisées. L'objectif seul de l'optimisation de la production par surface d'herbe pâturée est alors suffisant et l'aptitude à consommer l'herbe peut-être une qualité plus intéressante que l'efficacité alimentaire mesurée à l'auge.

L'influence du choix des méthodes de mesure directes des QI sur la variabilité du REI entre les études est moins nette (Tableau 2). Cependant, les deux méthodes de mesure des QI, auges

peseuses collectives et auges individuelles ne sont pas tout à fait comparables. L'hypothèse formulée dans l'estimation du REI, c'est que tous les animaux consomment la même ration. Cependant un facteur individuel non pris en compte dans la présente étude, car trop chronophage et onéreux, est le tri réalisé par les individus qui peut constituer un biais spécifique à un animal. Néanmoins, l'effet du tri sur la variabilité interindividuelle de l'énergie nette ingérée a été jugé minimal dans notre étude. En effet, l'écart de valeur énergétique entre les fourrages et les concentrés utilisés dans la ration de notre dispositif expérimental reste minimal comparé à une ration à base de fourrages moins énergétiques, tels que l'herbe conservée. Même si le tri est aussi possible en auge individuelle, ce tri n'influence que le contenu de l'auge de l'animal et pas la ration des autres auges. A l'opposé, pour les auges peseuses, les possibilités de tri sont accrues et le tri de l'animal influence non seulement sa propre consommation mais en plus, la composition de la ration des animaux qui passent après.

Les méthodes de mesure pour estimer les variations de réserves corporelles sont multiples dans la bibliographie (Tableau 1), mais il n'existe pas de méthode de référence généralisable qui fasse consensus. Ces méthodes passent par les variations soit de NEC, soit de PV, soit de PV vide (PVV). Cette diversité des méthodes de mesure des réserves corporelles contribue peut-être également aux différences de variabilité du REI relevées dans l'analyse bibliographique (Chapitre 1). A cet effet, le REI a été estimé en incluant les mêmes phénotypes que ceux inclus dans le modèle de référence de la présente étude (modèle 1) avec la perte et le gain de réserves corporelles mesurées de trois façons différentes : soit par la variation de NEC multiplié par le PV qui est notre référence (modèle 1), soit par la variation de PV multiplié par la NEC (modèle 2), soit par la variation de PVV multiplié par la NEC (modèle 3).

$$ENI_j = \mu + a_1 \times EN_{\text{lait}_j} + b \times (PV^{0,75})_j + c \times (PV_j \times \Delta NEC^+_j) + d \times (PV_j \times \Delta NEC^-_j) + REI_{\text{ref}_j} \quad (1)$$

$$ENI_j = \mu_1 + a_1 \times EN_{\text{lait}_j} + b_1 \times (PV^{0,75})_j + c_1 \times (NEC_j \times \Delta PV^+_j) + d_1 \times (NEC_j \times \Delta PV^-_j) + REI_{\text{pv}_j} \quad (2)$$

$$ENI_j = \mu_2 + a_2 \times EN_{\text{lait}_j} + b_2 \times (PV^{0,75})_j + c_2 \times (NEC_j \times \Delta PVV^+_j) + d_2 \times (NEC_j \times \Delta PVV^-_j) + REI_{\text{pvv}_j} \quad (3)$$

où ENI_j représente l'énergie nette ingérée pour la vache j ($j = 1-119$) en UFL/ j , EN_{lait_j} représente l'énergie nette du lait pour la vache j en UFL/ j , ΔNEC^+_j représente la somme des gains quotidiens de NEC sur la lactation pour la vache j , ΔNEC^-_j la somme des pertes quotidiennes de NEC sur la lactation pour la vache j , ΔPV^+_j représente la somme des gains

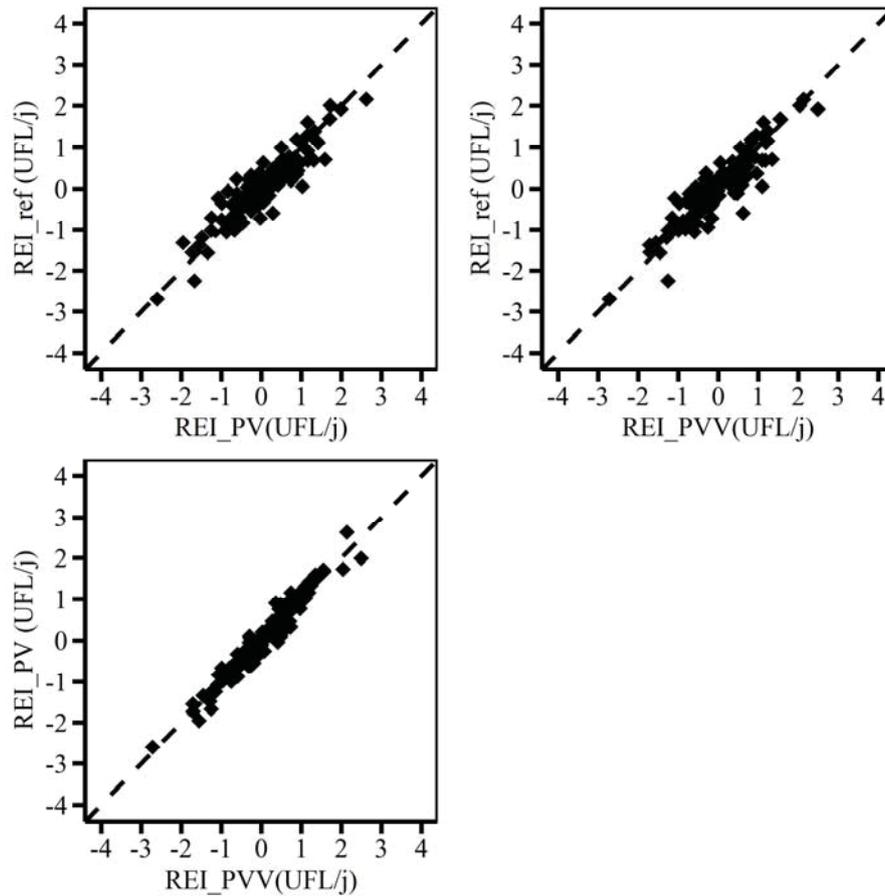


Figure 3 Comparaison des residual energy intake (REI) obtenus en utilisant trois méthodes différentes d'estimation des variations des réserves corporelles : la note d'état corporel (NEC, modèle 1), le poids vif (PV, modèle 2) et le poids vif vide (PVV, modèle 3). Le REI a été défini comme résidu de la prédiction de l'énergie nette ingérée par l'énergie nette du lait (ENlait), le poids vif métabolique ($PV^{0,75}$) et la perte de réserves corporelles sur la lactation et le gain de réserves corporelles sur la lactation.

$$ENI_j = \mu + a \times ENlait_j + b \times (PV^{0,75})_j + c \times (PV_j \times \Delta NEC^+_j) + d \times (PV_j \times \Delta NEC^-_j) + REI_ref_j \quad (1)$$

$$ENI_j = \mu_1 + a_1 \times ENlait_j + b_1 \times (PV^{0,75})_j + c_1 \times (NEC_j \times \Delta PV^+_j) + d_1 \times (NEC_j \times \Delta PV^-_j) + REI_pv_j \quad (2)$$

$$ENI_j = \mu_2 + a_2 \times ENlait_j + b_2 \times (PV^{0,75})_j + c_2 \times (NEC_j \times \Delta PVV^+_j) + d_2 \times (NEC_j \times \Delta PVV^-_j) + REI_pvv_j \quad (3)$$

où j représente la vache j ($j = 1-119$), ΔNEC^+_j représente la somme des gains quotidiens de NEC sur la lactation pour la vache j , ΔNEC^-_j la somme des pertes quotidiennes de NEC sur la lactation pour la vache j , ΔPV^+_j représente la somme des gains quotidiens de PV sur la lactation pour la vache j , ΔPV^-_j la somme des pertes quotidiennes de PV sur la lactation pour la vache j , ΔPVV^+_j représente la somme des gains quotidiens de PVV sur la lactation pour la vache j , ΔPVV^-_j la somme des pertes quotidiennes de PVV sur la lactation pour la vache j , avec le PVV le PV corrigé de 4,5 fois la MS ingérée, REI_ref_j , REI_pv_j et REI_pvv_j représentent respectivement le résidu du modèle 1, 2, 3, μ_1 , μ_2 , μ_3 représentent les ordonnées à l'origine et a , a_1 , a_2 , b , b_1 , b_2 , c , c_1 , c_2 et d , d_1 , d_2 représentent les coefficients des trois régressions linéaires.

quotidiens de PV sur la lactation pour la vache j en kg, ΔPV^-_j la somme des pertes quotidiennes de PV sur la lactation pour la vache j en kg, ΔPVV^+_j représente la somme des gains quotidiens de PVV sur la lactation pour la vache j en kg, ΔPVV^-_j la somme des pertes quotidiennes de PVV sur la lactation pour la vache j en kg, avec le PVV le PV corrigé de 4,5 fois la MS ingérée, REI_ref $_j$, REI_pv $_j$ et REI_pvv $_j$ représentent respectivement le résidu du modèle 1, 2, 3 en UFL/ j ; μ , μ_1 , μ_2 représentent les ordonnées à l'origine et a , a_1 , a_2 , b , b_1 , b_2 , c , c_1 , c_2 et d , d_1 , d_2 représentent les coefficients des trois régressions linéaires.

Les corrélations de Pearson entre les REI obtenus par ces trois modèles sont positives et fortes, avec une corrélation de 0,92 entre REI_ref et REI_pv, 0,90 entre REI_ref et REI_pvv et 0,97 entre REI_pv et REI_pvv (Figure 3). Les REI obtenus en utilisant le PV ou PVV sont plus proches que du REI obtenu en utilisant les variations de NEC, comme en témoigne les coefficients de corrélations précédents. Même s'il reste de la variabilité non partagée par le REI_ref et le REI_pv, et le REI_ref et le REI_pvv, les trois méthodes aboutissent à des efficacités similaires pour les vaches (Figure 3). Appliqués à la diversité des méthodes de mesure utilisées dans la bibliographie, ces résultats suggèrent que le REI n'est pas influencé par le choix de la méthode d'estimation de la variation des réserves corporelles et que donc les études sont comparables sur ce point. Néanmoins dans notre étude, ainsi que les études concernées dans la bibliographie, la NEC a été mesurée manuellement, donc à bas débit. Comme la variabilité du REI se réduit quand la fréquence de mesure des variables du modèle augmente, l'augmentation de la fréquence de mesure de la NEC devrait en théorie réduire davantage la variabilité interindividuelle du REI (cf. section précédente). A cet effet, des méthodes de mesure à haut débit des variations des réserves corporelles, telles que celle développée dans le chapitre 3, se développent et pourront à l'avenir être utilisées.

b. Des variations des réserves corporelles qui deviennent accessibles à haut débit¹

i. Une méthode prometteuse d'estimation de la note d'état corporel par imagerie 3D, mais qui nécessite des ajustements supplémentaires pour une utilisation à haut débit

Un des enjeux du projet a été de développer une estimation objective et automatique de la NEC de la vache laitière pour permettre une mesure à haut débit de l'état et donc de la variation d'état des réserves corporelles. La méthode développée avec le bureau d'études 3DOuest (Lannion, France) estime la NEC à partir de l'analyse de la forme tridimensionnelle du bassin de la vache (Chapitre 3). La méthode automatique est à la fois précise, avec une erreur de mesure de 0,27 unité de NEC en validation externe dont la majorité est associée à de l'erreur aléatoire (70%), et 1,4 fois plus répétable que la NEC effectuée par palpation ou visuellement. A haut débit, cette méthode s'est avérée performante, avec notamment une NEC-3D ayant des variations plus fines que la NEC traditionnelle (Figure 4). En effet, la NEC-3D détecte des pertes d'état corporel également détectées par le PVV, mais non détectées par la NEC estimée de manière traditionnelle (vaches 1339, 2371 et 2408 Figure 4). Dans certains cas, la NEC-3D est systématiquement inférieure ou supérieure à la NEC traditionnelle (vaches 2359 et 9054 Figure 4). Ce décalage entre les deux méthodes de NEC soulève la question d'un biais des notateurs qui auraient tendance à ne pas noter aussi loin dans les extrêmes que la méthode par imagerie.

L'utilisation de cette méthode à haut débit, en l'occurrence dans le cadre des essais autour de l'efficience alimentaire de ce projet, a révélé des freins techniques à lever pour réaliser des estimations à haut débit et exploitables, à la fois pour ce projet et pour être applicable demain en ferme commerciale. En effet, deux freins techniques ont été identifiés : l'identification automatique des vaches et une forte sensibilité de la qualité des images 3D au mouvement des

¹ Cette partie a fait l'objet d'un chapitre d'ouvrage et d'un mémoire de fin d'études :

Faverdin P and Fischer A 2016. Monitoring du poids et de l'état corporel. In *Elevage de précision* (eds. S Chastant-Maillard and M Saint-Dizier), pp. 125-144, Editions France Agricole, Paris, France.

Charrier A 2015. Utilisation du poids vif pour le monitoring des réserves corporelles et des matières sèches ingérées. For Master degree (Supervised by P Faverdin and A Fischer), Agrocampus-Ouest, Rennes, France.

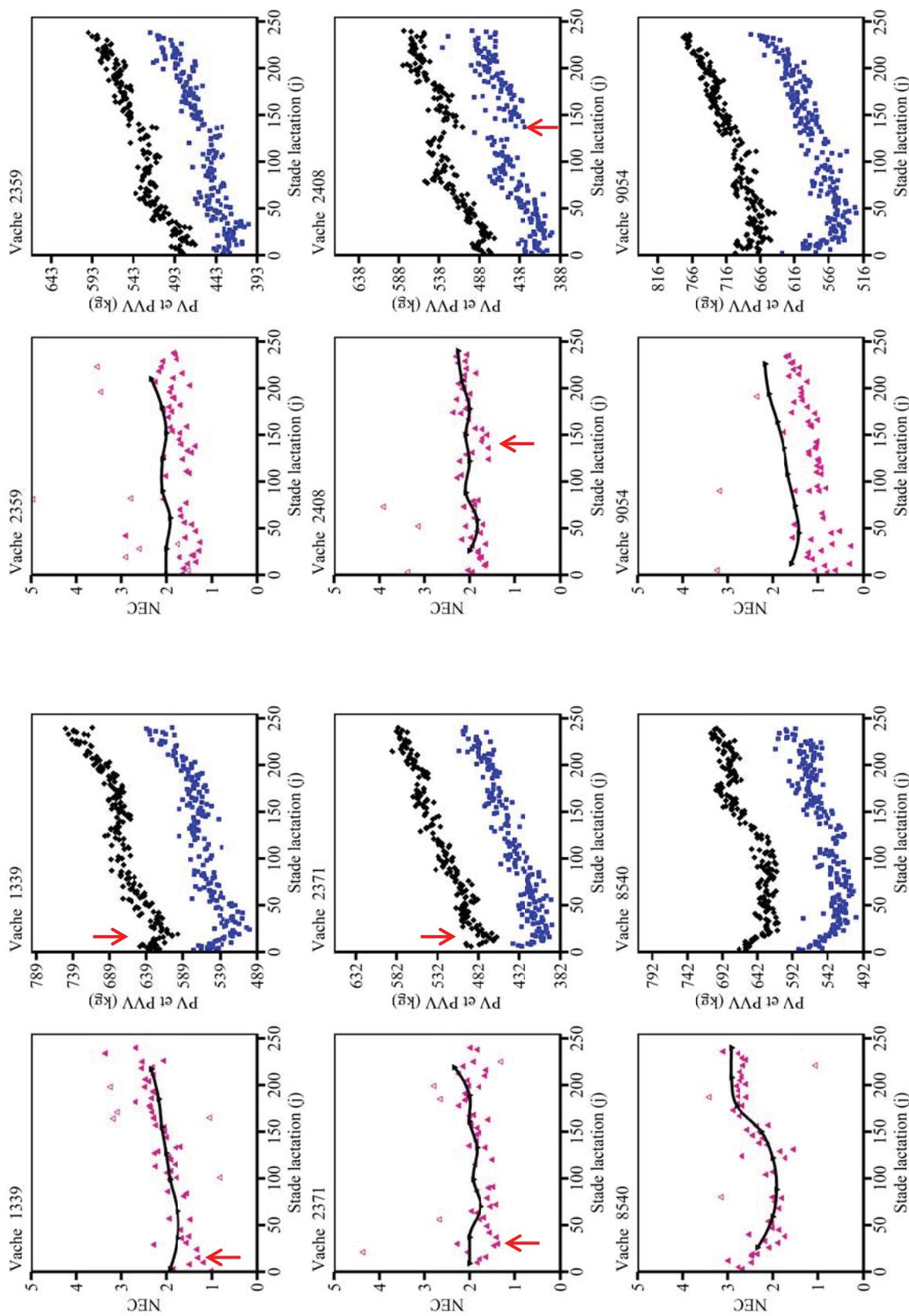


Figure 4 Exemples de cinétiques de note d'état corporel mesurée par palpation (NEC▼) ou par imagerie 3D (NEC3D ▲), du poids vif (PV ◆) et du PV corrigé de 4,5 fois la matière sèche ingérée (PVV ■) pour 6 vaches pour lesquelles la NEC3D fonctionne bien. Les événements non repérés par la NEC mais repérés par la NEC3D et le PVV sont marqués par ↑. Les NEC3D détectées aberrantes sont symbolisées par (△).

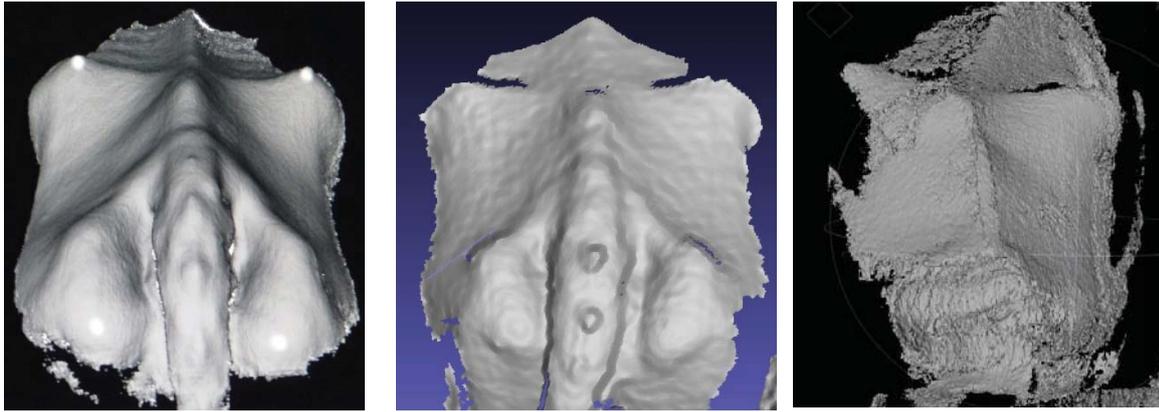


Figure 5 Exemples d'images 3D obtenues pour une vache avec le système d'acquisition original avec une image de bonne qualité (gauche) et de mauvaise qualité (droite) et avec le système d'acquisition instantanée (milieu).

vaches. Le prototype était installé à l'entrée du dispositif de pesées de l'installation expérimentale de Méjusseume. L'utilisation du système d'identification des vaches déjà en place pour la pesée n'était pas accessible directement pour extraire les identifiants. Les tentatives d'utilisation d'un autre système d'identification, indépendant de celui utilisé pour le poids, s'est avéré impossible du fait de la perturbation importante du système sur un rayon de 5 m autour de la stalle de pesée liée aux ondes émises par le système d'identification de la pesée. Toutes les identifications ont donc été effectuées à la main, limitant ainsi le nombre d'acquisitions réalisables à deux par semaine. Malgré un temps faible de 3s pour le balayage par la caméra de la zone du bassin de la vache et la contention de la vache dans la stalle de pesée, 10 à 30% des images 3D réalisées par traite étaient inexploitable. Ces images 3D étaient en effet de mauvaise qualité parce que la vache avait bougé lors de l'acquisition (Figure 5 et 6).

Comme ce problème se produit de façon systématique avec certaines vaches, les NEC-3D obtenues pour 10 des 60 vaches utilisées n'étaient pas exploitables. Par conséquent, la NEC traditionnelle a été privilégiée pour les 60 vaches, pour avoir une méthode d'estimation homogène pour l'ensemble des troupeaux de Méjusseume et des Trinottières.

Pour lever les deux verrous identifiés, un prototype, en cours de test à l'installation expérimentale de Méjusseume, est positionné en hauteur au-dessus de la salle de traite rotative et l'acquisition est déclenchée automatiquement par un système d'identification des stalles, et donc. des vaches. Pour réduire le temps nécessaire à la caméra pour scanner le bassin de la vache et donc réduire le risque de mauvaise qualité des images 3D, la caméra utilisée réalise une seule image instantanée, à la place du balayage avec 90 images 3D

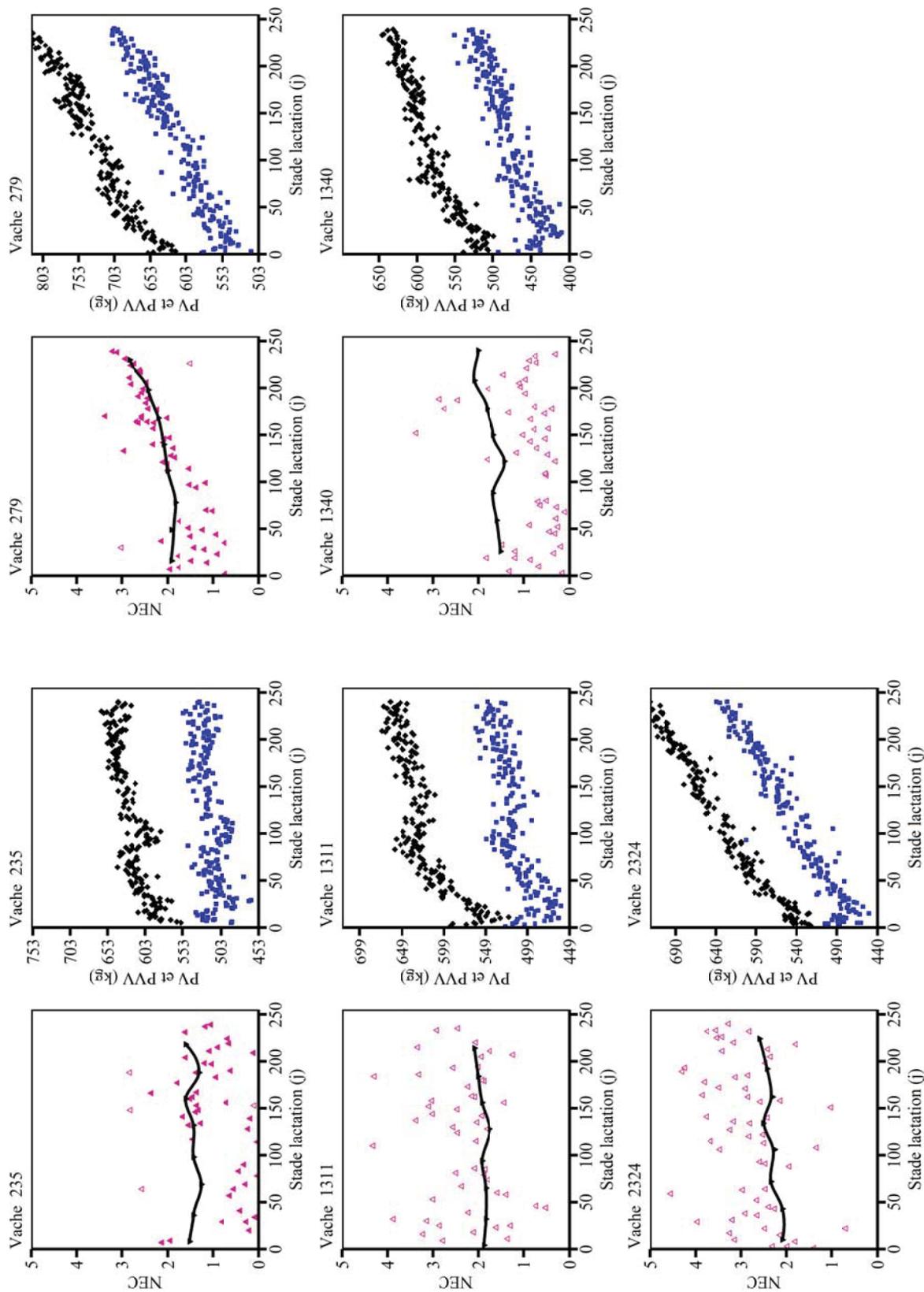


Figure 6 Exemples de cinétiques de note d'état corporel mesurée par palpation (NEC▼) ou par imagerie 3D (NEC3D ▲), du poids vif (PV ◆) et du PV corrigé de 4,5 fois la matière sèche ingérée (PVV ■) pour des vaches bougeant régulièrement durant l'acquisition. Les NEC3D aberrantes sont symbolisées par (△).

réalisé par l'ancien prototype. Par ailleurs, le positionnement des vaches dans les stalles du roto est meilleur que sur la balance et le risque de mauvaise qualité des images devrait donc être réduit. Même si la résolution des images 3D obtenues en instantané sera plus faible que celle avec le prototype original, l'utilisation à haut débit permise par ce nouveau prototype permettra de réduire considérablement les erreurs de mesure.

ii. Une estimation des variations de réserves corporelles par la modélisation des variations du poids vif

Les variations de PV sont intéressantes pour mesurer les variations de réserves corporelles chez la vache laitière, principalement parce que c'est une méthode qui devient accessible en fermes commerciales, notamment avec le développement des robots de traite et des systèmes de pesée dynamique. L'interprétation des variations de PV reste difficile parce que le PV combine quatre composantes : les masses des contenus digestifs, lipidique, délipidée et osseuse. Les variations du PV concernent donc les variations de réserves corporelles (masses lipidique et délipidée), mais aussi les variations des deux autres compartiments qui évoluent différemment avec l'âge, la race et l'alimentation. La modélisation du poids des autres compartiments du PV est donc nécessaire pour estimer la variation des réserves corporelles à partir des variations de PV. Chez la vache laitière adulte, les variations de la masse osseuse sont négligeables, comme l'illustre la perte de seulement 1 kg de la masse osseuse entre la 1^{ère} et la 8^{ème} semaine de lactation pour une diminution du PVV de 142 kg (Chilliard *et al.*, 1983). A l'inverse, la masse des contenus digestifs, qui est fonction des QI des derniers jours, varie fortement au cours de la lactation. La correction des variations de PV par les variations de QI des derniers jours permettrait ainsi d'isoler les variations de réserves corporelles dans les variations du PV : c'est le poids vif vide. Ce PVV est difficile à mesurer car les QI ne sont pas accessibles en élevage. Différentes méthodes ont été proposées pour estimer le PVV à partir des variations de PV. L'une d'elle propose d'estimer le PVV comme un pourcentage du PV qui évolue au cours de la lactation, en modélisant la cinétique du PV au cours de la lactation (Thorup *et al.*, 2012). Une autre approche consiste à estimer les QI à partir des variations de PV, puis de corriger le PV des variations de QI estimées pour calculer le PVV (Charrier, 2015). Ce travail montre qu'il est possible d'estimer les QI d'un jour donné, t , à partir de la variation de PV du lendemain (jour $t+1$ – jour t), des besoins énergétiques pour le lait et l'entretien du jour t , de la densité énergétique de la ration du jour t et des QI du jour précédent, $t-1$. Il suffit d'initier la suite mathématique avec une valeur des QI au premier jour

de lactation ; les autres données (PV, densité énergétique de la ration et énergie du lait) sont mesurées et accessibles en élevage. L'erreur de prédiction de l'ingestion journalière réalisée avec cette méthode reste élevée avec une erreur moyenne de 3,3 kg MS/j, mais elle traduit assez bien les variations d'ingestion à court terme, ce qui reste difficile avec les autres méthodes (Figure 7). Cette erreur varie selon les vaches et est fonction de l'efficacité des vaches, ce qui est cohérent avec le concept même du REI. Cette erreur d'estimation s'est avérée plus importante en début de lactation, avec des QI sous-estimées, reflétant la difficulté du modèle à différencier les variations de PV associées à la mobilisation de celles associées à l'augmentation des QI. Des améliorations sont à apporter mais les résultats offrent des perspectives intéressantes pour modéliser d'une part les QI à partir des variations de PV, des besoins pour le lait et l'entretien et de la densité énergétique de la ration et d'autre part pour utiliser ces QI prédites pour estimer un PVV et donc approcher les variations de réserves corporelles.

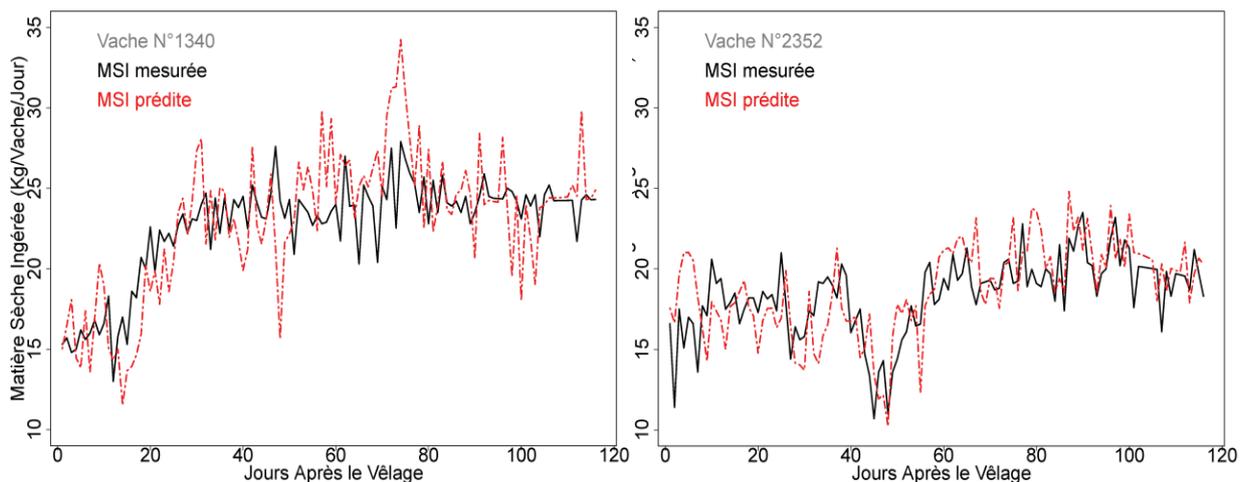


Figure 7 Comparaison des quantités ingérées mesurées (—) et prédites (-----) à partir de la production laitière, du poids vif et de la densité énergétique de la ration, au cours des quatre premiers mois de lactation pour deux vaches laitières Holstein (issu de Charrier, 2015).

iii. Une estimation de la masse lipidique et de la masse délipidée qui reste difficile

Le défaut principal des méthodes utilisées à haut débit pour estimer les variations des réserves corporelles est de ne pas permettre de distinguer les masses lipidiques des masses délipidées. Or le coût énergétique de ces deux masses est différent, le dépôt de protéines étant moins

coûteux que le dépôt lipidique (Chilliard *et al.*, 1987). La distinction entre les deux composantes est essentielle, surtout dans le cadre de l'étude de l'efficacité alimentaire où il faut pouvoir estimer les dépenses et les apports énergétiques associés à la variation des réserves corporelles. Les méthodes utilisées à haut débit permettent soit d'estimer la somme des composantes lipidiques et délipidées corporelles, via l'analyse de la variation de PVV, soit d'estimer la composante lipidique sous-cutanée, via les méthodes par échographie (Schröder and Staufenbiel, 2006) ou la NEC (Rémond *et al.*, 1988). L'estimation de la composante lipidique et délipidée du PV est délicate et souvent approchée par modélisation de ces deux composantes à partir de constantes universelles (Friggens *et al.*, 2007) et du PVV (Thorup *et al.*, 2013). A l'inverse, les variations de la composante lipidique sous-cutanée, mesurées indirectement par les variations de NEC ou d'épaisseur de gras sous-cutané, ne reflètent pas linéairement le gras corporel (Robelin, 1982). Quand l'état des réserves corporelles est faible, les réserves abdominales restent mobilisables alors que les réserves sous-cutanées ne le sont plus. Il en est de même pour la NEC dont la relation avec la quantité de lipides corporels n'est pas clairement établie, tantôt considérée comme linéaire (Waltner *et al.*, 1994) tantôt comme quadratique (Rémond *et al.*, 1988). Cette question de distinction entre masse lipidique et délipidée est surtout importante à prendre en compte quand la population contient des individus encore en croissance (primipares et certaines multipares). En effet, certaines primipares finissent leur croissance durant leur lactation et gagnent plutôt de la masse musculaire et osseuse alors que les autres gagnent et perdent surtout de la masse lipidique. Même si la population étudiée dans la présente étude contenait des primipares et des multipares, les différences de REI n'étaient pas significatives entre les primipares et multipares ($P = 0,45$). L'estimation de la masse lipidique et délipidée est donc importante mais reste difficilement accessible à haut débit.

c. L'appréciation de l'efficacité alimentaire par le REI varie en fonction des sources de dépenses énergétiques prises en compte dans le modèle

L'ensemble des résultats obtenus dans ce travail a considéré une unique définition de l'efficacité alimentaire : le résidu de la prévision d'énergie nette ingérée à partir des différentes dépenses d'énergie nette attendues pour couvrir les besoins associés à la synthèse de lait, l'entretien et la perte et le gain de réserves corporelles. Dans le chapitre de synthèse bibliographique (Chapitre 1), nous avons soulevé le problème de l'influence des variables indépendantes prises en compte dans le modèle sur la variabilité interindividuelle du REI. En

l'occurrence, une forte variabilité de la définition des dépenses énergétiques à considérer avait été notée (Tableau 1). En théorie, toute variable responsable de variations interindividuelles d'énergie nette ingérée non prise en compte dans le modèle se retrouve dans le REI. En effet, la non prise en compte de la perte de NEC dans le modèle identifie les vaches efficaces comme celles qui mobilisent plus (Vallimont *et al.*, 2011). Appliqué à notre base de données, nous avons comparé des REI issus de quatre modèles différents en termes de variables explicatives : un avec les quatre variables de base (modèle 1), un sans les variations de réserves corporelles (modèle 2), un sans le PV métabolique (représentant l'entretien, modèle 3), et un simultanément sans les variations de réserves corporelles et sans le PV métabolique (modèle 4) :

$$ENI_j = \mu + a \times EN_{lait_j} + b \times (PV_j^{0,75})_j + c \times (PV_j \times \Delta NEC^+_j) + d \times (PV_j \times \Delta NEC^-_j) + REI_{ref_j} \quad (1)$$

$$ENI_j = \mu_3 + a_3 \times EN_{lait_j} + b_3 \times (PV_j^{0,75})_j + REI_{No_NEC_j} \quad (2)$$

$$ENI_j = \mu_4 + a_4 \times EN_{lait_j} + c_4 \times (PV_j \times \Delta NEC^+_j) + d_4 \times (PV_j \times \Delta NEC^-_j) + REI_{No_ent_j} \quad (3)$$

$$ENI_j = \mu_5 + a_5 \times EN_{lait_j} + REI_{No_ent_NEC_j} \quad (4)$$

avec μ l'ordonnée à l'origine, a, b, c et d les coefficients de la régression, ENI l'énergie nette ingérée de la vache j ($j = 1-119$), ΔNEC^+ la somme sur la lactation du gain quotidien de NEC pour la vache j et ΔNEC^- la somme sur la lactation de la perte quotidienne de NEC pour la vache j, REI_{ref_j} le résidu du modèle 1 pour la vache j, $REI_{No_NEC_j}$ le résidu du modèle 2 pour la vache j, $REI_{No_ent_j}$ le résidu du modèle 3 pour la vache j et $REI_{No_ent_NEC_j}$ le résidu du modèle 4 pour la vache j.

La variabilité de l'énergie nette ingérée inexplicée par ces quatre modèles augmente significativement lorsque l'on retire les dépenses liées à l'entretien ou à la variation des réserves corporelles (Tableau 3). L'écart-type du REI augmente considérablement quand le nombre de variables indépendantes diminue, en passant de 0,79 UFL/j dans le modèle 1 à 1,26 UFL/j dans le modèle 4. D'autre part nous observons des coefficients de régression très différents entre modèles (Tableau 3). L'ordonnée à l'origine devient significativement non nulle lorsqu'une des dépenses énergétiques est retirée du modèle. Cette ordonnée à l'origine traduit l'impossibilité du modèle à expliquer les consommations d'énergie nette sans créer une source ou un puits d'énergie indéterminé. Ce manque de robustesse du modèle utilisé pour estimer le REI est également souligné par les corrélations de Pearson obtenues entre le REI des 4 modèles testés qui varient de 0,62 entre les REI des modèles 2 et 3 à 0,91 entre les

REI des modèles 1 et 2 (Tableau 4). La corrélation entre le REI incluant les quatre variables et le REI estimé sans le PV métabolique est similaire à la valeur de 0,81 rapportée par Hurley *et al.* (2016). Le choix des variables prises en compte dans le modèle est donc important car les REI obtenus avec deux modèles différents ne sont pas similaires et risquent d'identifier des animaux aux caractéristiques zootechniques assez différentes (cf. section 1 de ce chapitre).

Tableau 3 Comparaison des caractéristiques des 3 régressions linéaires ajustées pour estimer le residual energy intake (REI) comme résidus de la prédiction de l'énergie nette ingérée (ENI) à partir de combinaisons différentes de l'énergie nette du lait (ENlait), du poids vif métabolique (PV^{0,75}) et des pertes (ΔNEC⁻) et gains (ΔNEC⁺) de note d'état corporel.

	REI_ref ¹		REI_No_NEC ²		REI_No_ent ³		REI_No_ent_NEC ⁴	
	Coeff.	P	Coeff.	P	Coeff.	P	Coeff.	P
μ	-1,7	0,09	-3,7	0,0003	4,8	1 10 ⁻¹⁴	6,2	1,6 10 ⁻¹⁵
a	0,84	0	0,70	0	1,11	0	1,05	0
b	0,08	5 10 ⁻¹¹	0,12	0	NA	NA	NA	NA
c	0,0015	1 10 ⁻⁵	NA	NA	0,0028	3 10 ⁻¹⁴	NA	NA
d	-0,0012	3 10 ⁻⁶	NA	NA	-0,0022	3 10 ⁻¹⁴	NA	NA
R ²	0,92	NA	0,90	NA	0,89	NA	0,80	NA
ETr	0,79	NA	0,87	NA	0,96	NA	1,26	NA

$$^1 ENI_j = \mu + a \times ENlait_j + b \times (PV^{0,75})_j + c \times (PV_j \times \Delta NEC^+_j) + d \times (PV_j \times \Delta NEC^-_j) + REI_ref_j \quad (1)$$

$$^2 ENI_j = \mu_3 + a_3 \times ENlait_j + b_3 \times (PV^{0,75})_j + REI_No_NEC_j \quad (2)$$

$$^3 ENI_j = \mu_4 + a_4 \times ENlait_j + c_4 \times (PV_j \times \Delta NEC^+_j) + d_4 \times (PV_j \times \Delta NEC^-_j) + REI_No_ent_j \quad (3)$$

$$^4 ENI_j = \mu_5 + a_5 \times ENlait_j + REI_No_ent_NEC_j \quad (4)$$

Avec μ l'ordonnée à l'origine, a, b, c et d les coefficients de la régression, PV_j le poids vif de la vache j (j = 1-119) et NEC_j la note d'état corporel de la vache j, REI_ref, le résidu du modèle 1, REI_No_NEC le résidu du modèle 2, REI_No_ent, le résidu du modèle 3 et REI_No_ent_NEC le résidu du modèle 4.

NA = critère non adapté ; Coeff. = coefficient de la régression ; P = probabilité critique associée au coefficient ; R² = coefficient de détermination ; ETr = écart-type des résidus du modèle, i.e. du REI.

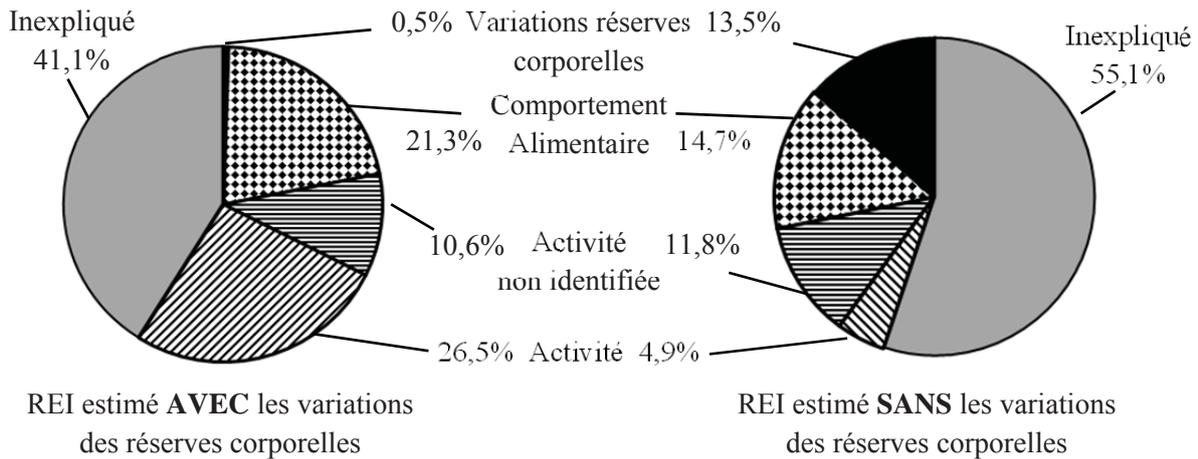


Figure 8 Contribution de chacun des facteurs biologiques moyennés sur la lactation à la variabilité du residual energy intake (REI). Le REI a été estimé comme le résidu de la prédiction de l'énergie nette ingérée à partir des dépenses énergétiques associées à la synthèse de lait, l'entretien, la perte et au gain de réserves corporelles (diagramme à gauche) ou uniquement à partir des dépenses associées à la synthèse de lait et à l'entretien (diagramme à droite).

Tableau 4 Matrice de corrélations entre les residual energy intake (REI) obtenus pour 4 modèles de régression différents et différentes variables du modèle d'estimation de ces REI. Les quatre modèles sont des combinaisons différentes des variables explicatives : énergie nette du lait (ENlait), poids vif métabolique ($PV^{0,75}$) et pertes (ΔNEC^-) et gains (ΔNEC^+) de note d'état corporel.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.REI_ref ¹									
2.REI_No_NEC ²	0,91 ^{***}								
3.REI_No_ent ³	0,83 ^{***}	0,62 ^{***}							
4.REI_No_ent_NEC ⁴	0,63 ^{***}	0,69 ^{***}	0,76 ^{***}						
5. ΔNEC^-	-0,01	-0,16 [†]	-0,06	-0,27 ^{**}					
6. ΔNEC^+	-0,01	0,04	-0,08	0,10	0,81 ^{***}				
7. ΔPVV^-	-0,09	-0,23 ^{**}	-0,03	-0,24 ^{**}	0,37 ^{***}	0,12			
8. ΔPVV^+	0,11	0,16 [†]	0,30 ^{***}	0,52 ^{***}	-0,18 [†]	0,10	-0,17 [†]		
9. $PV^{0,75}$	0,00	0,00	0,34 ^{***}	0,53 ^{***}	0,08	0,25 ^{**}	0,26 ^{**}	0,29 ^{**}	
10.ENlait	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35 ^{***}	0,26 ^{**}	0,51 ^{***}	-0,19 ^{**}	0,68 ^{***}

La significativité des corrélations est représentée par [†] (P<0,1), ^{*} (P<0,05), ^{**} (P<0,01) et ^{***} (P<0,001).

$$^1 ENI_j = \mu + a \times ENlait_j + b \times (PV_j^{0,75})_j + c \times (PV_j \times \Delta NEC^+_j) + d \times (PV_j \times \Delta NEC^-_j) + REI_ref_j \quad (1)$$

$$^2 ENI_j = \mu + a \times ENlait_j + b \times (PV_j^{0,75})_j + REI_No_NEC_j \quad (2)$$

$$^3 ENI_j = \mu + a \times ENlait_j + c \times (PV_j \times \Delta NEC^+_j) + d \times (PV_j \times \Delta NEC^-_j) + REI_No_ent_j \quad (3)$$

$$^4 ENI_j = \mu + a \times ENlait_j + REI_No_ent_NEC_j \quad (4)$$

avec μ l'ordonnée à l'origine, a, b, c et d les coefficients de la régression, ENI_j l'énergie nette ingérée de la vache j (j = 1-119), PV_j le poids vif de la vache j, NEC_j la note d'état corporel de la vache j, REI_ref_j , le résidu du modèle 1, $REI_No_NEC_j$ le résidu du modèle 2, $REI_No_ent_j$, le résidu du modèle 3 et $REI_No_ent_NEC_j$ le résidu du modèle 4.

II. Les mécanismes biologiques impliqués dans les différences interindividuelles d'efficacité alimentaire chez la vache laitière

Les variables identifiées (Chapitre 5) comme étant associées à la variabilité interindividuelle du REI regroupent la digestibilité, le comportement alimentaire, la variation de la température ruminale et l'activité physique (Figure 8). Cependant ces résultats ne sont valables que pour la définition de l'efficacité alimentaire utilisée dans la présente étude, c'est-à-dire la variabilité de l'énergie nette ingérée prédite par les dépenses énergétiques pour couvrir les besoins associés à la synthèse de lait, l'entretien, la perte et le gain de réserves corporelles. En effet, les REI obtenus avec des modèles différents, bien que corrélés positivement, ne représentent pas exactement la même variabilité (cf. 1.b). Si les variables sont considérées comme une dépense d'énergie qui présente un intérêt en élevage soit comme produit soit comme qualité d'élevage, elles sont à intégrer dans le modèle et n'expliqueront pas les différences interindividuelles d'efficacité alimentaire. La place de chacun des mécanismes potentiellement explicatifs des différences de REI inter-vaches est discutée dans les paragraphes suivants.

a. Le besoin d'entretien : une dépense énergétique intéressante ou superflue ?

Le besoin d'entretien expliquait 23,2% de la variabilité de l'énergie nette ingérée (Chapitre 5), le plaçant donc à la seconde place derrière l'énergie nette du lait parmi les mécanismes explicatifs de la variabilité interindividuelle de l'énergie nette ingérée. L'objectif de cette section est de discuter la place des dépenses associées à l'entretien, mesurées par le PV métabolique, dans l'efficacité alimentaire : soit comme dépenses énergétiques dans l'estimation de l'efficacité alimentaire, soit comme déterminant de l'efficacité, en considérant que ces dépenses sont une source d'économie possible. En choisissant de considérer les dépenses associées à l'entretien comme une source d'économie possible, les vaches identifiées comme efficaces risquent d'être des vaches ayant un PV métabolique plus faible. En effet, la non prise en compte du PV métabolique dans l'estimation de la variabilité interindividuelle du REI donne un REI qui n'a qu'une corrélation égale à 0,83 avec le REI incluant les quatre variables de base (Tableau 4). De plus, les vaches sont d'autant plus efficaces que leur PV métabolique est faible quand le REI est estimé sans prendre en compte les variations de PV métabolique ($r = 0,34$, Tableau 4). La corrélation équivalente obtenue par

Hurley *et al.* (2016) est plus faible ($r = 0,18$). Le risque de sélectionner des vaches qui ont un poids vif métabolique plus faible est de sélectionner des vaches ayant une carcasse moins lourde et des veaux plus légers. En effet, le poids de la carcasse est fortement corrélé au PV (Robelin, 1986) ou au PV corrigé du poids des contenus digestifs ($r = 0,98$, Fox *et al.*, 1976). Par ailleurs, une corrélation génétique positive a été mise en évidence entre le PV de la mère et l'effet génétique direct du veau ($r = 0,56$) et de la mère sur le poids de naissance du veau ($r = 0,22$; Renand *et al.*, 2010): plus le PV de la mère est élevé, plus l'effet génétique de la mère va influencer le poids du veau à la naissance. Cette relation positive entre PV de la mère et poids du veau à la naissance ou au sevrage a également été observée chez la vache laitière par Paputungan et Makarechian (2000), Mourer *et al.* (2010) et Beck *et al.* (2016). Ces résultats suggèrent que sélectionner des vaches qui ont un PV métabolique plus faible, i.e. donc un PV plus faible, risque de diminuer les poids adultes et donc de carcasse des vaches de réforme et des veaux. Dans des pays comme la Nouvelle-Zélande ou l'Australie, la part de QI dépensée pour l'entretien est plutôt vue comme un coût plutôt qu'un bénéfice pour l'atelier lait (Pryce *et al.*, 2015). La sélection tend donc à sélectionner des vaches avec un besoin d'entretien plus faible. La question de la prise en compte ou non du besoin d'entretien dans l'estimation de l'efficacité alimentaire est donc difficilement généralisable et se réfléchit plutôt à l'échelle de la filière lait et viande du pays considéré. Une autre approche pourrait consister à évaluer l'efficacité alimentaire d'un kg de carcasse produit en filière viande spécialisée (incluant la mère et le veau) et en filière lait pour calculer la valeur d'une diminution de format en termes d'efficacité alimentaire. Le développement de la semence sexée pour ne produire que des femelles laitières en race pure et des mâles en croisement permettrait d'éviter de produire des mâles de race pure laitière de petit format et de faible valeur bouchère.

b. La variation des réserves corporelles : une économie de dépense d'énergie ou une perte de qualité d'élevage ?

La variation des réserves corporelles mesurée par les variations de NEC expliquait 5% de la variabilité de l'énergie nette ingérée (Chapitre 5), la plaçant donc à la troisième place derrière l'énergie nette du lait et l'entretien parmi les mécanismes explicatifs de la variabilité interindividuelle de l'énergie nette ingérée. La question posée est de savoir si la capacité à mobiliser des réserves corporelles ou à engraisser est à considérer comme un besoin de base ou comme une caractéristique des différences d'efficacité alimentaire entre vaches. En effet, la non prise en compte des dépenses ou apports associés aux variations des réserves

corporelles dans l'estimation du REI tend à identifier des vaches efficaces qui mobilisent significativement plus ($r = -0,16$ pour ΔNEC^- et $r = -0,23$ pour ΔPVV^- ; Tableau 4) et reconstituent moins leurs réserves corporelles ($r = 0,16$ pour ΔPVV^+ ; Tableau 4) et cela malgré une corrélation forte entre les REI obtenus ($r = 0,91$; Tableau 4). Ce constat a aussi été fait par Vallimont *et al.* (2011). Quand les variations de réserves corporelles ne sont pas prises en compte pour estimer le REI, la variabilité des QI associée à la variation des réserves corporelles explique 13,5% de la variabilité du REI (Figure 7).

Les réserves corporelles permettent à la vache de gérer les écarts entre apports et besoins énergétiques au cours de la lactation, soit par la mobilisation, soit par la constitution des réserves corporelles (Garnsworthy, 1988). Ne pas considérer l'énergie apportée par la mobilisation des réserves corporelles va sous-estimer le REI, car le modèle considère que pour couvrir ses productions, la vache n'utilise que l'énergie apportée par les QI, alors qu'en fait elle utilise aussi l'énergie mobilisée dans les réserves corporelles. Cette capacité à couvrir une partie des besoins par la mobilisation en début de lactation et à reconstituer ultérieurement, donc à ne pas prendre en compte les variations de réserves dans l'estimation du REI, peut présenter un intérêt économique pour l'éleveur, notamment en modifiant l'alimentation de la vache au cours de la lactation. Dans le Chapitre 4, nous avons vu que la mobilisation d'une unité de NEC représente une dépense énergétique (171 UFL) inférieure à celle nécessaire pour reconstituer cette même unité (214 UFL), ce qui conforte les résultats de Chilliard *et al.* (1987). Cet écart peut être interprété de deux façons dans l'optique d'une conduite alimentaire. La première considère qu'il est plus économique de réduire la mobilisation pour réduire l'écart, lié au coût énergétique de reconstitution plus élevé que l'apport par la mobilisation, en apportant plus de concentrés en début de lactation et peu ou rien en fin de lactation. La seconde considère à l'inverse qu'avec de bonnes rations, on peut laisser l'animal mobiliser pour économiser du concentré en début de lactation, puis compter sur un fourrage de qualité pour reconstituer les réserves corporelles. Même si cette seconde solution a un coût supérieur en énergie, elle peut permettre l'économie d'aliments coûteux comme le concentré. Cependant, dans ce cas, les variations des réserves corporelles sont considérées comme déterminants de l'efficacité alimentaire, i.e. aboutissant à sélectionner des vaches qui mobilisent plus et reconstituent moins. Les risques associés à cette sélection sont notamment une augmentation de la prévalence de troubles métaboliques et une baisse de la fertilité, généralement associées à une trop forte mobilisation des réserves corporelles (cf. Chapitre 1). Ce risque peut être accru avec des régimes peu énergétiques qui ne vont pas favoriser une bonne reconstitution des réserves corporelles. A l'inverse, dans des systèmes

alimentaires à forte densité énergétique, des vaches qui déposent trop de gras pendant la deuxième partie de lactation ne sont pas forcément intéressantes parce qu'elles risquent d'être trop grasses au vêlage, augmentant ainsi le risque d'acétonémie et de fertilité détériorée (cf. Chapitre 1, I.b). Compte-tenu des risques importants en perte de qualité d'élevage associés à une trop forte mobilisation des réserves corporelles, les dépenses et apports associés aux variations des réserves corporelles sont plutôt à prendre en compte dans l'estimation du REI.

c. L'activité physique : une économie possible d'énergie ou une fonction utile ?

L'activité physique expliquait 26,5% de la variabilité du REI (Chapitre 5), avec des vaches d'autant plus inefficaces qu'elles passent du temps debout ($r = 0,30$) et en suractivité ($r = 0,33$). Cette dépense énergétique associée à un surplus d'activité physique par rapport à la moyenne peut être considérée comme une dépense inutile car n'aboutissant pas à un produit directement valorisable par l'éleveur. L'activité est donc souvent considérée comme un potentiel déterminant de l'efficacité alimentaire (Tableau 5 Chapitre 1) plutôt qu'un besoin de base à prendre en compte pour estimer l'efficacité alimentaire (Tableau 1). Cependant, comme évoqué dans le chapitre 5, l'activité physique peut être vue comme un avantage dans des systèmes basés sur le pâturage ou utilisant la traite robotisée. Dans un système pâturant, les vaches passent plus de temps debout que dans un système à l'auge en bâtiment (Roca-Fernández *et al.*, 2013), en raison d'une durée d'ingestion plus importante au pâturage qu'à l'auge. De la même manière, les vaches passent plus de temps debout, notamment dans la salle d'attente de traite, dans un système de traite robotisée dont le flux du trafic est forcé, par rapport aux autres gestions de trafic (Jacobs and Siegford, 2012). Dans tous ces cas, des vaches passant plus de temps debout peuvent être plus adaptées au système que celles qui passent moins de temps debout.

Les relations positives obtenues entre REI et durée passée en suractivité ($r = 0,33$) ou intensité de la suractivité ($r = 0,24$) sont à regarder plus en détail, notamment parce que la suractivité est la principale variable prise en compte dans la détection automatisée des chaleurs pour le capteur utilisé. Néanmoins, la seule information de la suractivité est une mesure très indirecte de la chaleur et ne suffit pas pour conclure sur la relation entre l'efficacité alimentaire et l'expression des chaleurs. La détection de chaleur avec le capteur utilisé dans la présente est précise car 87% des chaleurs détectées correspondent réellement à des chaleurs et assez sensible car 62% des chaleurs observées sont détectées par le capteur (Chanvallon *et al.*,

2012). Une première analyse des données issues de ce capteur ne met pas en évidence de relation significative entre l'efficacité alimentaire et le nombre de chaleurs détectées sur la lactation (Figure 9). Néanmoins, pour confirmer ou infirmer ces observations, des analyses approfondies sont nécessaires, d'une part pour vérifier que les vaches efficaces sont bien cyclées et ont des ovulations et d'autre part pour vérifier que ces ovulations sont bien exprimées par la vache.

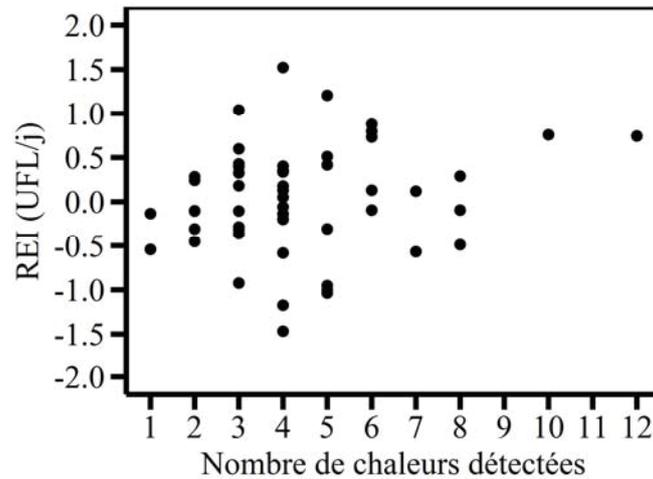


Figure 9 Relation entre le nombre de chaleurs détectées par le capteur et l'efficacité alimentaire mesurée par le residual energy intake (REI) comme le résidu de la prédiction de l'énergie nette ingérée à partir de l'énergie nette du lait, le poids vif métabolique et la perte et le gain de note d'état corporel.

d. La digestibilité : un déterminant important de l'efficacité alimentaire ?

Les résultats du chapitre 5 concernant la digestibilité suggèrent que les différences d'efficacité alimentaire entre vaches laitières sont associées à des différences de digestibilité, comme en témoigne la corrélation obtenue de -0,26 entre la digestibilité et le REI. L'interprétation de cette corrélation reste cependant limitée parce que la mesure indirecte proposée par R. Delagarde dans le cadre du travail de L. Denouel (2016) n'est pas assez précise pour détecter de vraies différences interindividuelles de digestibilité. La principale hypothèse formulée pour ce manque de précision est la forte variabilité interindividuelle du taux de récupération du marqueur indigestible utilisé (Figure 10).

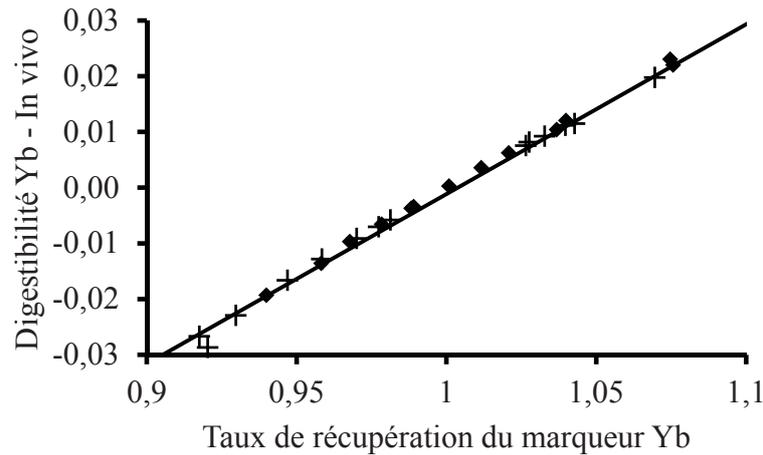


Figure 10 Relation entre le taux de récupération du marqueur ytterbium (Yb) et la différence de digestibilité de la matière sèche obtenue avec la méthode indirecte par marqueur ytterbium (Yb) et avec la méthode de référence *In Vivo*, pour deux périodes consécutives (+ et ◆) (d'après Denouel, 2016).

La relation de causalité entre la digestibilité et l'efficacité alimentaire est difficile à caractériser, notamment parce que la digestibilité peut être la cause ou la résultante d'autres mécanismes, tel que le comportement alimentaire. Dans notre étude, le comportement alimentaire, décrit par les durées d'ingestion et de rumination, était négativement corrélé au REI (Chapitre 5). Cette relation entre comportement alimentaire et REI est soutenue par la corrélation positive obtenue entre la variation quotidienne de la température ruminale et le REI ($r = 0,36$). En effet, la variation de la température ruminale corrigée de l'effet boisson reflète en théorie la variation de la chaleur fermentaire, elle-même associée au comportement alimentaire. Les principales sources de variation des chaleurs fermentaires sont liées au comportement alimentaire, soit par la taille des repas ingérés, soit par la taille des particules des aliments dans le rumen (Le Liboux and Peyraud, 1998). Par conséquent, la variation de la température ruminale peut être considérée comme associée au comportement alimentaire.

L'ensemble de ces résultats suggère donc un possible lien entre efficacité et digestibilité ou entre efficacité et comportement alimentaire. L'intérêt d'avoir des vaches qui digèrent mieux la ration est principalement d'avoir moins de pertes dans les fèces et dans les urines et gaz de fermentation et donc plus de nutriments disponibles par kg de MS ingérée. La place de la digestibilité dans l'efficacité alimentaire serait donc naturellement définie comme déterminant potentiel de l'efficacité alimentaire et non comme besoin de base à prendre en compte dans l'estimation de l'efficacité alimentaire. Pour le comportement alimentaire, davantage d'analyses sont nécessaires pour identifier précisément les caractéristiques du

comportement alimentaire associées aux différences interindividuelles d'efficacité alimentaire. La fréquence, la taille des repas et la vitesse d'ingestion sont régulièrement évoquées dans la bibliographie comme étant associées aux différences d'efficacité alimentaire que ce soit chez la vache laitière (Connor *et al.*, 2013, Xi *et al.*, 2016) et les bovins allaitants (Kelly *et al.*, 2010, Pereira *et al.*, 2016). Certaines caractéristiques du comportement alimentaire, telles que la taille des particules, i.e. l'efficacité de la comminution, et la taille des repas, ont été identifiées dans la bibliographie comme étant des facteurs de variation de la digestibilité chez la vache laitière. Ces deux caractères définissent des pistes intéressantes à analyser du point de vue de l'efficacité alimentaire. En effet, Le Liboux and Peyraud (1999) ont montré que plus la taille des particules de la ration était grande, plus la digestibilité était faible et qu'en passant de 2 à 6 repas imposés par jour, la digestibilité totale n'était pas différente mais la digestibilité ruminale de l'amidon augmentait. Ces résultats restent cependant difficiles à interpréter car ils ne permettent pas de conclure sur le lien de causalité entre comportement alimentaire et digestibilité à l'échelle de l'individu. Ces études ne permettent pas de savoir si le comportement alimentaire est volontaire ou s'il est subi par la vache, à cause notamment de la conformation de son tractus digestif telle que la taille du rumen (Peyraud *et al.*, 1993) ou de sa mâchoire. Si les vaches efficaces sont effectivement des vaches qui font des repas moins grands et ont une meilleure comminution, contribuant probablement à une meilleure digestibilité, la place du comportement alimentaire est clairement définie comme déterminant potentiel de l'efficacité alimentaire. Néanmoins, quand les vaches sont au pâturage, celles réalisant des repas plus petits pourraient être désavantagées, principalement parce que l'herbe, riche en eau, est un fourrage encombrant et que par conséquent une forte quantité d'herbe doit être ingérée pour couvrir les besoins de la vache. Là encore, la place du comportement est à réfléchir selon le système d'élevage. L'influence de la composition de la ration sur l'efficacité alimentaire est au final un élément qui ressort comme étant essentiel pour mieux définir l'efficacité alimentaire.

III. Perspectives d'application en ferme des résultats obtenus

Les principaux freins à l'amélioration de l'efficacité alimentaire en élevage de vaches laitières identifiés dans le Chapitre 1 étaient d'une part la difficulté à définir l'efficacité alimentaire et d'autre part la difficulté à la mesurer (Veerkamp *et al.*, 2013). L'objectif de cette partie est de discuter les possibilités de mesure de l'efficacité alimentaire en ferme, en discutant le choix de l'indicateur, les méthodes indirectes potentielles pour estimer l'efficacité alimentaire et le choix de la période de mesure au cours de la lactation.

a. Choix de l'indicateur à utiliser : REI ou ratio ?²

Dans la filière laitière française, plusieurs acteurs ont ajouté l'estimation de l'efficacité alimentaire de la vache à leurs indicateurs de conseil. L'indicateur principalement utilisé, selon 15 entreprises enquêtées de la filière laitière française, est l'indicateur type ratio (Chanteloube *et al.*, 2015). Cependant sa définition reste très variable. En effet, même si tous les indicateurs sont tous majoritairement calculés comme le rapport entre la composition et le volume de lait par QI, les indicateurs diffèrent pour les facteurs de correction utilisés : parité, stade de lactation, quantité de concentrés distribuée, profil en acides gras du lait. Les indicateurs sont donc difficilement comparables inter-troupeaux. Cette difficulté à comparer les fermes entre elles et au cours du temps dans le cas d'un même troupeau est une remarque régulièrement évoquée lors des entretiens. La plupart reconnaissent les limites de leur indicateur et ne voient cet indicateur que comme un indicateur « noyé » dans la masse.

Le choix de l'indicateur à utiliser pour mesurer l'efficacité alimentaire est important car les indicateurs de type REI et de type ratio ne mesurent pas exactement la même chose (cf. chapitre 1, partie I.2). Le défaut du ratio est qu'en général il ne prend en compte que les QI et les dépenses associées à la synthèse de lait. Pour inclure les autres dépenses de base à prendre en compte pour estimer l'efficacité alimentaire, il faudrait avoir une mesure directe des besoins pour l'entretien et la variation des réserves corporelles, tous exprimés dans la même unité. Le moyen le plus simple de le faire est soit de passer par les systèmes d'alimentation, soit de passer par une régression linéaire comme celle utilisée pour estimer le REI et

² Cette partie a fait l'objet d'un projet d'étudiants ingénieurs agronomes Agrocampus-Ouest que j'ai co-encadré avec L. Montagne et J. Jurquet et ayant abouti à une communication sous forme de poster :

Chanteloube A, Gicquel M, Le Chenadec H, Leroy M, Fischer A, Montagne L and Jurquet J 2015. Etat des lieux de l'utilisation de la notion d'efficacité alimentaire par la filière bovin lait. In 22ème Journées Rencontres Recherches Ruminants, 02-03/12/2016, Paris, France, p. 257.

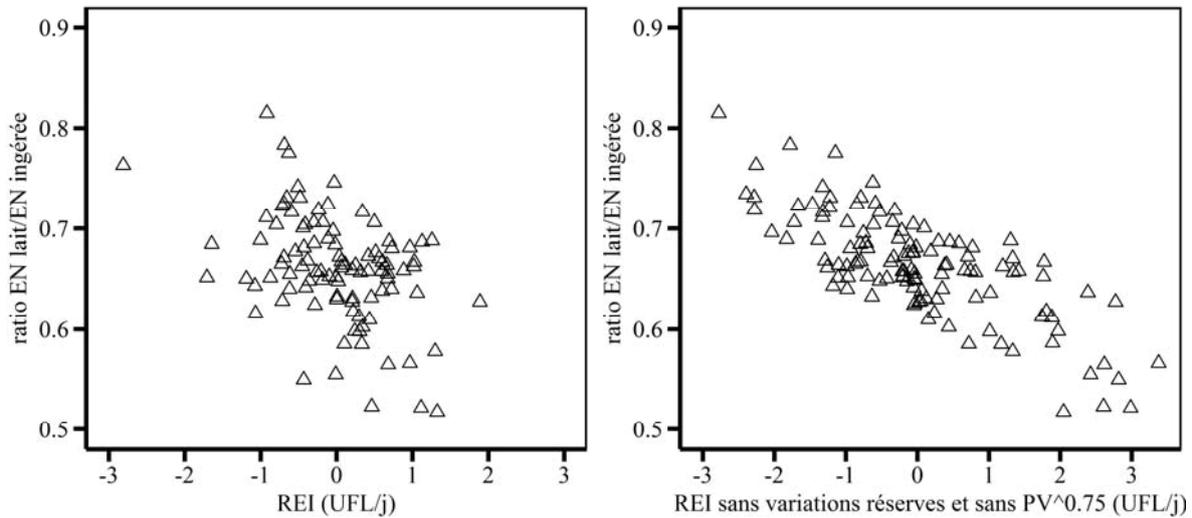


Figure 11 Relation entre l'efficacité alimentaire mesurée par le ratio entre l'énergie nette (EN) du lait et l'EN ingérée et par le residual energy intake (REI) estimé comme le résidu de la prédiction de l'EN ingérée à partir de l'EN lait, du poids vif métabolique, de la perte et du gain de note d'état corporel (graphe de gauche) ou uniquement à partir de l'EN du lait (graphe de droite).

Tableau 5 Corrélations de Pearson de deux indicateurs d'efficacité alimentaire, le ratio (Ratio) entre l'énergie nette du lait (ENlait) et l'énergie nette ingérée et le résidu (REI) de la régression de l'énergie nette ingérée en fonction de l'ENlait, avec les variables de base couramment prises en compte pour estimer l'efficacité alimentaire.

Variables	Ratio	REI
ΔNEC^-	0,44	-0,27
ΔNEC^+	0,09	0,1
ΔPVV^-	0,5	-0,24
ΔPVV^+	-0,52	0,52
$PV^{0,75}$	0,0085	0,53
ENlait	0,63	0

ΔNEC^- = Somme des pertes quotidiennes de note d'état corporelle sur la lactation ; ΔNEC^+ = Somme des gains quotidiens de note d'état corporelle sur la lactation ; ΔPVV^- = Somme des pertes quotidiennes de poids vif vide sur la lactation ; ΔPVV^+ = Somme des gains quotidiens de poids vif vide sur la lactation ; PVV = poids vif corrigé de 4,5 fois la matière sèche ingérée ; $PV^{0,75}$ = Poids vif métabolique.

d'extraire les coefficients de la régression obtenue pour l'entretien et les variations des réserves corporelles, comme réalisé par Hurley *et al.* (2016). Cette dernière méthode revient à estimer le REI et ne présente donc pas de grande différence. On peut cependant se demander si un REI uniquement estimé avec les besoins énergétiques pour le lait est équivalent au ratio entre les besoins énergétiques pour la synthèse de lait et les QI. Appliquée à notre base de données, la corrélation entre ce REI et le ratio n'est que de -0,77 (Figure 11). Dans les deux cas, les vaches sont d'autant plus efficaces qu'elles mobilisent des réserves corporelles et qu'elles reconstituent modérément leurs réserves (Tableau 5). L'inconvénient du ratio, aussi relevé dans la bibliographie (cf. chapitre 1), est qu'il est positivement et fortement corrélé à son numérateur, i.e. l'énergie nette du lait ($r = 0,63$, Tableau 5). A l'inverse, ce REI est fortement et positivement corrélé au PV métabolique ($r = 0,53$, Tableau 5) alors que le ratio ne l'est pas. La corrélation de ce ratio avec le REI_ref estimé avec les quatre variables de dépenses énergétiques est négative et beaucoup plus modérée ($r = -0,47$, Figure 11). Ces résultats confirment donc que le REI et le ratio ne mesurent pas la même efficacité, y compris quand les variables prises en compte dans le REI et dans le ratio sont les mêmes. Pour cette raison et les raisons identifiées auparavant (Chapitre 1), l'indicateur type ratio est à éviter pour la mesure de l'efficacité alimentaire.

b. Estimation de l'efficacité alimentaire en ferme par mesure indirecte sans les mesures des quantités ingérées

Pour estimer l'efficacité alimentaire individuelle, il faut soit estimer directement le REI, soit passer par une mesure indirecte du REI. L'estimation du REI n'est accessible que dans les installations équipées de systèmes de mesure individualisée des QI, uniquement accessibles dans certaines installations expérimentales. Pour cette raison l'approche la plus intéressante est de passer par des mesures indirectes de l'efficacité alimentaire, soit en utilisant les mécanismes associés aux variabilités interindividuelles du REI (Chapitre 5), soit en construisant un indicateur indirect du REI (Chapitre 6).

Les mécanismes identifiés dans ce manuscrit et dans la bibliographie comme associés à la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire de la vache laitière regroupent la digestibilité, le comportement alimentaire et l'activité physique. La digestibilité individuelle est aujourd'hui difficilement mesurable pour de gros effectifs, et encore moins en cinétique. La méthode de référence qui consiste à mesurer les QI individuelles et à collecter les fèces est trop chronophage et lourde pour une utilisation à haut débit. Les méthodes indirectes

développées, notamment par dosage de marqueurs indigestibles (cf. 1.d) ou par spectroscopie proche infra-rouge, ne sont pas assez précises pour mesurer des différences interindividuelles. Les deux autres mécanismes identifiés sont quant à eux plus accessibles en ferme commerciale, grâce notamment au développement et à la commercialisation d'accéléromètres qui mesurent en continu l'activité de la vache laitière (Ringgenberg *et al.*, 2010, Delagarde and Lemonnier, 2015, Borchers *et al.*, 2016, Swartz *et al.*, 2016).

L'indicateur proposé dans le chapitre 6 est basé sur l'efficacité de l'eau bue, étant le corolaire du REI pour la quantité d'eau bue par la vache et appelé EBR pour l'eau bue résiduelle. L'idée est que pour un même régime, la corrélation entre QI et quantité d'eau bue est forte (Khelil-Arfa *et al.*, 2012) et par conséquent, l'efficacité alimentaire devrait refléter l'efficacité de l'eau bue. Cette EBR a été définie comme le résidu de la prédiction de la quantité d'eau bue à partir du volume de lait produit et du PV. La corrélation entre REI et EBR est modérée ($r = 0,38$) mais l'intérêt majeur identifié est la capacité de l'EBR à identifier les vaches les plus efficaces. L'EBR semble donc être un « proxy » prometteur du REI pour identifier les vaches les plus efficaces, notamment parce qu'il a été construit sur des données accessibles en élevage : le volume de lait produit, le PV et l'eau bue, estimée avec la température ruminale. La température ruminale est mesurable en continu grâce à un thermobolus ruminal, commercialisé aujourd'hui en élevage. Cependant, il importe de valider la méthode sur un effectif plus grand et sur d'autres rations, notamment plus humides telles que des rations à base d'herbe fraîche ou ensilée.

Ces approches par proxy de l'efficacité alimentaire restent pour l'instant peu abordées dans la bibliographie. Une approche publiée récemment (Shetty *et al.*, 2017) consiste à utiliser l'analyse des spectres en moyen infra-rouge (**MIR**) du lait, une donnée couramment utilisée pour analyser la composition du lait. Les spectres MIR ont par exemple permis d'expliquer la variabilité du REI à hauteur de 28% en calibration et 20% en validation externe quand le REI était calculé sur les 40 premières semaines de lactation étudiées (Shetty *et al.*, 2017). Cependant cette variabilité expliquée était la plus importante sur les 9 premières semaines de lactation avec 60% expliqués en calibration et 29% en validation et était beaucoup plus faible sur le reste de la lactation, avec 9% expliqués en validation externe en milieu et fin de lactation (Shetty *et al.*, 2017). Les longueurs d'ondes caractéristiques du REI étaient des longueurs d'ondes caractéristiques de certains composants de la matière grasse du lait, matière protéique et du lactose. Cette forte différence d'explication entre le début et le reste de la lactation est probablement associée à la mobilisation des réserves corporelles qui n'est pas prise en compte dans le calcul du REI et qui constitue un apport conséquent d'énergie et de

protéines en début de lactation. Une piste serait donc de regarder si les longueurs d'onde identifiées caractérisent des composants du lait synthétisés grâce à la mobilisation des réserves corporelles. Si la corrélation entre ces longueurs d'onde et la mobilisation des réserves corporelles est importante, ces longueurs d'onde pourraient constituer une approche intéressante pour estimer la mobilisation des réserves corporelles (cf. I.b), mais pas forcément pour estimer un REI dont l'estimation tient compte des variations de réserves corporelles.

c. Définition d'une période de mesure réduite de la lactation aboutissant à une estimation du REI qui est proche du REI estimé sur la lactation totale

Une mesure sur toute la carrière de l'animal, ou même simplement sur toute la lactation de l'animal, n'est pas envisageable en ferme commerciale, même en utilisant des méthodes indirectes (cf. III.b). L'identification d'une période plus courte de mesure de l'efficacité alimentaire représentant l'efficacité alimentaire mesurée sur la totalité de la période serait intéressante. Le chapitre 4.1 a permis d'identifier la période allant de la 6^{ème} à la 17^{ème} quinzaine de lactation comme étant la période où le REI estimé par quinzaine était le plus répétable et le plus corrélé au REI estimé sur les 17 premières quinzaines de lactation. Dans ce chapitre 4.1, la quinzaine avait été identifiée comme trop courte pour estimer le REI, principalement à cause de la difficulté à mesurer avec précision les variations de réserves corporelles avec la NEC. La comparaison de périodes plus longues (Tableau 6) suggère que la période optimale, en durée et en stade de lactation, est celle de la quinzaine 7 à 11 de lactation. Bien que ne correspondant pas au maximum de corrélation obtenue avec le REI estimé sur la totalité de la période suivie (238 premiers jours de lactation), cette période de 2,5 mois consécutifs semble être le meilleur compromis entre durée et corrélation obtenue. Le maximum de corrélation entre le REI mesuré sur la lactation et le REI mesuré sur une période de la lactation est de 0,86 quand la période concerne la totalité des 5 mois allant de la quinzaine 7 à 16 (Tableau 6). Quand le REI est calculé sur des sous-périodes de ces 5 mois, la corrélation maximale est atteinte pour une période de mesure de 2,5 mois consécutifs allant de la quinzaine 7 à 11 (Tableau 6) et vaut 0,81 (Figure 11). De plus, l'écart-type des REI calculés par sous-période devient plus faible à partir d'une période de mesure d'au moins 2 mois consécutifs avec des valeurs inférieures à 1 UFL/j (Tableau 6). Dans la bibliographie, certains auteurs privilégient les 60 premiers jours de lactation (Connor *et al.*, 2013), mais ces auteurs ne se basaient que sur les 90 premiers jours de lactation comme période totale. Or étant donné

Tableau 6 Corrélation entre l'ingéré résiduel calculé avec des variables moyennées sur la lactation (REI lactation ; 17 premières quinzaines) et calculé avec des variables moyennées par sous-période de lactation. Les REI calculés par sous-périodes sont aussi décrits par leur écart-type (E.T. REI). Les sous-périodes sont décrites selon la longueur de la période et la période de lactation concernée exprimée en quinzaines de lactation. Les ingérés résiduels sont calculés comme les résidus du modèle qui explique l'énergie nette ingérée à partir de l'énergie nette du lait, du poids vif métabolique et de la perte et du gain de note d'état corporel multiplié par le poids vif (modèle 1 ci-dessous).

Longueur période	Période lactation (quinzaine)	Corrélation avec REI lactation	E.T. (REI)
Q	7	0,58	1,4
Q	8	0,61	1,2
Q	9	0,69	1,2
Q	10	0,56	1,3
Q	11	0,60	1,1
Q	12	0,53	1,2
Q	13	0,57	1,1
Q	14	0,62	1,2
Q	15	0,66	1,2
Q	16	0,69	1,3

M	7-8	0,64	1,1
M	9-10	0,71	1,1
M	11-12	0,64	1,0
M	13-14	0,66	1,0
M	15-16	0,75	1,2

M1/2	7-9	0,76	1,0
M1/2	10-12	0,66	1,0
M1/2	13-15	0,74	0,96

2M	7-10	0,77	0,94
2M	11-14	0,72	0,88

2M1/2	7-11	0,79	0,88
2M1/2	12-16	0,81	0,88

3M	7-12	0,78	0,84

4M	7-14	0,77	0,80

5M	7-16	0,86	0,75

Q = quinzaine ; M = mois ; M1/2 = 1 mois et demi ; 2M = 2 mois ; 2M1/2 = 2 mois et demi ; 3M = 3mois ; 4M = 4mois ; 5M = 5 mois.

$$\text{Modèle 1 : } \text{ENI}_j = \mu + a \times \text{ENlait}_j + b \times (\text{PV}^{0,75})_j + c \times (\text{PV}_j \times \Delta \text{NEC}^+_j) + d \times (\text{PV}_j \times \Delta \text{NEC}^-_j) + \text{REI}_j$$

Avec μ l'ordonnée à l'origine, a, b, c et d les coefficients de la régression, ENI_j l'énergie nette ingérée de la vache j (j = 1-119), PV_j le poids vif de la vache j, NEC_j la note d'état corporel de la vache j, REI_j , le résidu du modèle pour la vache j.

que nos résultats suggèrent d'éviter les 5 premières quinzaines de lactation (Chapitre 4.1), la généralisation de leurs résultats reste délicate. En bovins allaitants, sur une période de mesure de 90 jours consécutifs, Wang *et al.*(2006) concluent que 63 jours sont nécessaires pour bien estimer le REI. Avant toute généralisation sur la définition de la période, ces analyses sont à enrichir, notamment en utilisant une base de données plus grande et en testant différentes combinaisons de périodes au cours de la lactation, mais aussi sur plusieurs lactations consécutives.

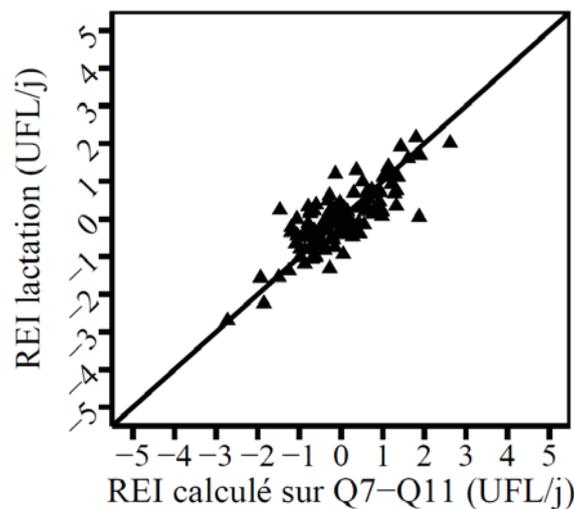


Figure 12 Relation entre le residual energy intake (REI) calculé avec des variables moyennées sur la lactation (17 premières quinzaines) et le REI calculé avec des variables moyennées sur 2 mois et demi (quinzaines 7 à 11 de la lactation). Les REI ont été estimés comme les résidus de la prédiction de l'énergie nette ingérée à partir des dépenses associées à la synthèse de lait, l'entretien, la perte et au gain de réserves corporelles.

Références

- Beck PA, Stewart CB, Gadberry MS, Haque M and Biermacher J 2016. Effect of mature body weight and stocking rate on cow and calf performance, cow herd efficiency, and economics in the southeastern United States. *Journal of Animal Science* 94, 1689-1702.
- Borchers MR, Chang YM, Tsai IC, Wadsworth BA and Bewley JM 2016. A validation of technologies monitoring dairy cow feeding, ruminating, and lying behaviors. *Journal of Dairy Science* 99, 7458-7466.
- Burczynski SE, Liesman JS, Tempelman RJ, Ploetz JC, Allen MS, Lock AL and VandeHaar MJ 2013. Residual feed intake is repeatable when high and low starch diets are fed to lactating Holstein dairy cows. In *ADSA-ASAS Joint Annual Meeting, 08-12/07/2013, Indianapolis, USA*, p. 168.
- Chanteloube A, Gicquel M, Le Chenadec H, Leroy M, Fischer A, Montagne L and Jurquet J 2015. Etat des lieux de l'utilisation de la notion d'efficacité alimentaire par la filière bovin lait. In *22ème Journées Rencontres Recherches Ruminants, 02-03/12/2016, Paris, France*, p. 257.
- Chanvallon A, Gatien J, Lamy JM, Girardot J, Davière JB, Ribaud D and Salvetti P 2012. Evaluation de la détection automatisée des chaleurs par différents appareils chez la vache laitière. In *19ème Journées Rencontres Recherches Ruminants, 07-08/12/2016, Paris, France*, pp. 397-400.
- Charrier A 2015. Utilisation du poids vif pour le monitoring des réserves corporelles et des matières sèches ingérées. For Master degree (Supervised by P Faverdin and A Fischer), Agrocampus-Ouest, Rennes, France.
- Chilliard Y, Rémond B, Sauvant D and Vermorel M 1983. Particularités du métabolisme énergétique. *Bulletin Technique C.R.Z.V. Theix INRA* 53, 37-64.
- Chilliard Y, Rémond B, Agabriel J, Robelin J and Verite R 1987. Variations du contenu digestif et des réserves corporelles au cours du cycle gestation-lactation. *Bulletin Technique C.R.Z.V. de Theix* 70, 117-131.
- Coleman J, Berry DP, Pierce KM, Brennan A and Horan B 2010. Dry matter intake and feed efficiency profiles of 3 genotypes of Holstein-Friesian within pasture-based systems of milk production. *Journal of Dairy Science* 93, 4318-4331.
- Connor EE, Hutchison JL, Norman HD, Olson KM, Van Tassell CP, Leith JM and Baldwin RL 2013. Use of residual feed intake in Holsteins during early lactation shows potential to improve feed efficiency through genetic selection. *Journal of Animal Science* 91, 3978-3988.
- Crozat C, Goron JP, Lapoute JL and Laurent M 2009. Coût des fourrages dans les élevages laitiers de Rhône-Alpes De la production jusqu'à la gueule de l'animal. In Eds. C Crozat, JP Goron, JL Lapoute and M Laurent), pp. 1-6. *PEP Rhône-Alpes Bovins Lait, FIDOCL Contrôle Laitier, Chambres d'agriculture, Institut de l'élevage, Région Rhône-Alpes, France*.

- Davis SR, Macdonald KA, Waghorn GC and Spelman RJ 2014. Residual feed intake of lactating Holstein-Friesian cows predicted from high-density genotypes and phenotyping of growing heifers. *Journal of Dairy Science* 97, 1436-1445.
- Delagarde R and Lemonnier JP 2015. Accuracy of the FeedPhone device for recording eating and rumination times in dairy cows. In 18th Symposium of the European Grassland Federation, 15-17/06/2015, Wageningen, The Netherlands, pp. 203-205.
- Denouel L 2016. Phénotypage de la digestibilité à l'échelle du troupeau par l'ytterbium chez la vache laitière. For Master degree (Supervised by R Delagarde), Agrocampus-Ouest, Rennes, France.
- Dillon P 2006. Achieving high dry-matter intake from pasture with grazing dairy cows. In *Fresh herbage for dairy cattle the key to a sustainable food chain* (eds. A Elgersma, J Dijkstra and S Tamminga), pp. 1-26, Springer, The Netherlands.
- Finneran E, Crosson P, O'Kiely P, Shalloo L, Forristal D and Wallace M 2012. Stochastic simulation of the cost of home-produced feeds for ruminant livestock systems. *The Journal of Agricultural Science* 150, 123-139.
- Fischer A, Friggens NC, Berry DP and Faverdin P 2017. Isolating the cow-specific part of residual energy intake in lactating dairy cows using random regressions. *Animal*. (*under review*)
- Fox DG, Dockerty TR, Johnson RR and Preston RL 1976. Relationship of empty body weight to carcass weight in beef cattle. *Journal of Animal Science* 43, 566-568.
- Friggens NC, Ridder C and Løvendahl P 2007. On the use of milk composition measures to predict the energy balance of dairy cows. *Journal of Dairy Science* 90, 5453-5467.
- Garnsworthy PC 1988. The effect of energy reserves at calving on performance of dairy cows. In *Nutrition and lactation in the dairy cow* (ed. PC Garnsworthy), pp. 157-170, Butterworths, Tiptree, UK.
- Hurley AM, López-Villalobos N, McParland S, Kennedy E, Lewis E, O'Donovan M, Burke JL and Berry DP 2016. Inter-relationships among alternative definitions of feed efficiency in grazing lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 99, 468-479.
- Jacobs JA and Siegford JM 2012. Invited review: The impact of automatic milking systems on dairy cow management, behavior, health, and welfare. *Journal of Dairy Science* 95, 2227-2247.
- Kelly AK, McGee M, Crews DH, Fahey AG, Wylie AR and Kenny DA 2010. Effect of divergence in residual feed intake on feeding behavior, blood metabolic variables, and body composition traits in growing beef heifers. *Journal of Animal Science* 88, 109-123.
- Khelil-Arfa H, Boudon A, Maxin G and Faverdin P 2012. Prediction of water intake and excretion flows in Holstein dairy cows under thermoneutral conditions. *Animal* 6, 1662-1676.
- Le Liboux S and Peyraud JL 1998. Effect of forage particle size and intake level on fermentation patterns and sites and extent of digestion in dairy cows fed mixed diets. *Animal Feed Science and Technology* 73, 131-150.

- Le Liboux S and Peyraud JL 1999. Effect of forage particle size and feeding frequency on fermentation patterns and sites and extent of digestion in dairy cows fed mixed diets. *Animal Feed Science and Technology* 76, 297-319.
- Macdonald KA, Pryce JE, Spelman RJ, Davis SR, Wales WJ, Waghorn GC, Williams YJ, II, Maret LC and Hayes BJ 2014. Holstein-Friesian calves selected for divergence in residual feed intake during growth exhibited significant but reduced residual feed intake divergence in their first lactation. *Journal of Dairy Science* 97, 1427-1435.
- Manafiazar G, McFadden T, Goonewardene L, Okine E, Basarab J, Li P and Wang Z 2013. Prediction of residual feed intake for first-lactation dairy cows using orthogonal polynomial random regression. *Journal of Dairy Science* 96, 7991-8001.
- Manafiazar G, Goonewardene L, Miglior F, Crews DH, Basarab JA, Okine E and Wang Z 2016. Genetic and phenotypic correlations among feed efficiency, production and selected conformation traits in dairy cows. *Animal* 10, 381-389.
- Mantysaari P, Liinamo AE and Mantysaari EA 2012. Energy efficiency and its relationship with milk, body, and intake traits and energy status among primiparous Nordic Red dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 95, 3200-3211.
- Mourer GL, MCMurphy CP, Devuyst E and Lalman DL 2010. The relationship of cow size to calf weaning weight in a commercial cow/calf operation in the southern Great Plains. In ASAS Joint Annual Meeting, 11-15/07/2010, Denver, USA, p. 771.
- Paputungan U and Makarechian M 2000. The Influence of Dam Weight, Body Condition and Udder Scores on Calf Birth Weight and Preweaning Growth Rates in Beef Cattle. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 13, 435-439.
- Pereira MCS, Cruz GD, Arrigoni MDB, Rigueiro ALN, Silva J, Carrara TVB, Santos PCS, Cursino LL and Millen DD 2016. Relationships of feedlot performance, feeding behavior, rumen morphometrics, and carcass characteristics of Nellore cattle differing in phenotypic residual feed intake. *Journal of Animal Science* 94, 4287-4296.
- Pérez-Ramírez E, Peyraud JL and Delagarde R 2012. N-alkanes v. ytterbium/faecal index as two methods for estimating herbage intake of dairy cows fed on diets differing in the herbage : maize silage ratio and feeding level. *Animal* 6, 232-244.
- Peyraud JL, Widyobroto BP and Faverdin P 1993. Effects of addition of water-filled bladders or volatile fatty acids into the rumen on digesta passage in the dairy cows eating ad libitum. *Annales de Zootechnie* 42, 187.
- Potts SB, Boerman JP, Lock AL, Allen MS and VandeHaar MJ 2015. Residual feed intake is repeatable for lactating Holstein dairy cows fed high and low starch diets. *Journal of Dairy Science* 98, 4735-4747.

- Pryce JE, Gonzalez-Recio O, Nieuwhof G, Wales WJ, Coffey MP, Hayes BJ and Goddard ME 2015. Hot topic: Definition and implementation of a breeding value for feed efficiency in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 98, 7340-7350.
- Rémond B, Robelin J, Chilliard Y and Ollier A 1988. Estimation de la teneur en lipides des vaches laitières Pie Noires par la méthode de notation de l'état d'engraissement. *INRA Productions Animales* 1, 111-114.
- Renand G, Vinet A, Krauss D and Saintilan R 2010. Relation entre l'ouverture pelvienne et l'aptitude génétique au vêlage en race bovine Charolaise. In *Rencontres Recherches Ruminants*, 8-9/12/2010, Paris, France, pp. 451-454.
- Ringgenberg N, Bergeron R and Devillers N 2010. Validation of accelerometers to automatically record sow postures and stepping behaviour. *Applied Animal Behaviour Science* 128, 37-44.
- Robelin J 1982. A note on the estimation *in vivo* of body fat in cows using deuterium oxide or adipose-cell size. *Animal Production* 34, 347-350.
- Robelin J 1986. Bases physiologiques de la production de viande: croissance et développement des bovins. In *Production de viande bovine* (ed. D Micol), pp. 35-60, INRA, Paris, France.
- Roca-Fernández AI, Ferris CP and González-Rodríguez A 2013. Short communication. Behavioural activities of two dairy cow genotypes (Holstein-Friesian vs. Jersey x Holstein-Friesian) in two milk production systems (grazing vs. confinement). *Spanish Journal of Agricultural Research* 11, 120-126.
- Schröder UJ and Staufenbiel R 2006. Invited Review: Methods to determine body fat reserves in the dairy cow with special regard to ultrasonographic measurement of backfat thickness. *Journal of Dairy Science* 89, 1-14.
- Shetty N, Løvendahl P, Lund MS and Buitenhuis AJ 2017. Prediction and validation of residual feed intake and dry matter intake in Danish lactating dairy cows using mid-infrared spectroscopy of milk. *Journal of Dairy Science* 100, 253-264.
- Swartz TH, McGilliard ML and Petersson-Wolfe CS 2016. Technical note: The use of an accelerometer for measuring step activity and lying behaviors in dairy calves. *Journal of Dairy Science* 99, 9109-9113.
- Tempelman RJ, Spurlock DM, Coffey M, Veerkamp RF, Armentano LE, Weigel KA, de Haas Y, Staples CR, Connor EE, Lu Y and VandeHaar MJ 2015. Heterogeneity in genetic and nongenetic variation and energy sink relationships for residual feed intake across research stations and countries. *Journal of Dairy Science* 98, 2013-2026.
- Thorup VM, Edwards D and Friggens NC 2012. On-farm estimation of energy balance in dairy cows using only frequent body weight measurements and body condition score. *Journal of Dairy Science* 95, 1784-1793.

- Thorup VM, Højsgaard S, Weisbjerg MR and Friggens NC 2013. Energy balance of individual cows can be estimated in real-time on farm using frequent liveweight measures even in the absence of body condition score. *Animal* 7, 1631-1639.
- Vallimont JE, Dechow CD, Daubert JM, Dekleva MW, Blum JW, Barlieb CM, Liu W, Varga GA, Heinrichs AJ and Baumrucker CR 2011. Short communication: Heritability of gross feed efficiency and associations with yield, intake, residual intake, body weight, and body condition score in 11 commercial Pennsylvania tie stalls. *Journal of Dairy Science* 94, 2108-2113.
- Veerkamp RF, Emmans GC, Cromie AR and Simm G 1995. Variance components for residual feed intake in dairy cows. *Livestock Production Science* 41, 111-120.
- Veerkamp RF, Pryce JE, Spurlock DM, Berry DP, Coffey M, Lovendahl P, Van der Linde R, Bryant JR, Miglior F, Wang Z, Winters M, Krattenmacher N, Charfeddine N, Pedersen J and de Haas Y 2013. Selection on feed intake or feed efficiency: a position paper from gDMI breeding goal discussions. In INTERBULL Meeting, 23-25/08/2013, Nantes, France, pp. 15-22.
- Waltner SS, McNamara JP, Hillers JK and Brown DL 1994. Validation of indirect measures of body fat in lactating cows. *Journal of Dairy Science* 77, 2570-2579.
- Wang Z, Nkrumah JD, Li C, Basarab JA, Goonewardene LA, Okine EK, Crews DH and Moore SS 2006. Test duration for growth, feed intake, and feed efficiency in beef cattle using the GrowSafe System1. *Journal of Animal Science* 84, 2289-2298.
- Xi YM, Wu F, Zhao DQ, Yang Z, Li L, Han ZY and Wang GL 2016. Biological mechanisms related to differences in residual feed intake in dairy cows. *Animal* 10, 1311-1318.
- Yao C, Spurlock DM, Armentano LE, Page CD, VandeHaar MJ, Bickhart DM and Weigel KA 2013. Random Forests approach for identifying additive and epistatic single nucleotide polymorphisms associated with residual feed intake in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 96, 6716-6729.
- Yao C, de los Campos G, VandeHaar MJ, Spurlock DM, Armentano LE, Coffey M, de Haas Y, Veerkamp RF, Staples CR, Connor EE, Wang Z, Hanigan MD, Tempelman RJ and Weigel KA 2017. Use of genotype x environment interaction model to accommodate genetic heterogeneity for residual feed intake, dry matter intake, net energy in milk, and metabolic body weight in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 100, 2007-2016.

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse était d'analyser la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire de la vache laitière et de comprendre quels sont les mécanismes associés aux différences interindividuelles. Pour se centrer sur la question des différences interindividuelles liées à l'efficacité et réduire l'effet possible de l'environnement, l'ensemble des mesures a été réalisé sur des animaux conduits dans un environnement aussi constant que possible. A cet effet, l'ensemble des vaches a été alimenté avec une ration unique et constante et logé en bâtiment pendant toute la lactation. Un premier résultat important de la thèse est la faible variabilité interindividuelle estimée pour l'efficacité alimentaire, car elle ne représentait que 8,2% de la variabilité de l'énergie nette ingérée. Cette variabilité se traduit en un surplus d'ingestion de 1,5 UFL/j pour les 10% de vaches les moins efficaces par rapport à l'ingestion moyenne du troupeau et en une économie d'ingestion de 1,4 UFL/j pour les 10% les plus efficaces par rapport à l'ingestion moyenne du troupeau. L'effet de ces valeurs, parmi les plus faibles de la bibliographie, ne sont cependant pas négligeables sur la valeur du coût alimentaire.

Grâce à un dispositif expérimental de monitoring à haut débit utilisant des nouveaux outils de monitoring, ce projet a pu suivre simultanément la majorité des mécanismes candidats pour expliquer les différences interindividuelles d'efficacité alimentaire. Les différences d'efficacité alimentaire estimées dans cette thèse ont pu être expliquées à 58,9% par des différences de comportement alimentaire et d'activité physique. Le dispositif expérimental n'a pas été suffisant pour caractériser la relation de causalité de ces deux caractères avec l'efficacité alimentaire, d'autant plus qu'ils semblaient redondants avec les différences interindividuelles de digestibilité et de variation de température ruminale. Des analyses supplémentaires sont impératives pour mieux comprendre la relation de ces caractères entre eux et identifier quels mécanismes sont à l'origine de leur variabilité et de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire. Il est possible que cela soit très dépendant des conditions environnementales et ne soit pas généralisable dans toutes les situations. Cependant, si effectivement le comportement alimentaire et l'activité physique sont des déterminants importants de l'efficacité alimentaire, la sélection pourrait directement se faire sur ces deux caractères, car ils expliqueraient les différences d'efficacité alimentaire et en plus sont mesurables à haut débit en élevage.

Un verrou majeur identifié dans l'analyse bibliographique et confirmé dans les résultats de la thèse est l'interprétation de la variabilité de l'indicateur « ingéré résiduel » utilisé pour

estimer l'efficacité alimentaire. Cet indicateur est estimé comme le résidu de la prédiction des quantités ingérées d'aliments par les dépenses énergétiques associées à la synthèse de lait, l'entretien et les variations des réserves corporelles. Sa variabilité est souvent interprétée comme la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire alors qu'en fait elle inclut aussi par définition l'ensemble des erreurs de mesure des variables du modèle. L'utilisation de méthodes de mesure précises et à haut débit permet de réduire les erreurs de mesure associées à chacune des variables du modèle et par conséquent la part d'erreur du modèle, i.e. de l'ingéré résiduel. L'utilisation d'un modèle avec des coefficients individuels a permis d'isoler la part de variabilité de l'énergie nette prédite associée à l'individu et non aux erreurs de mesure. Sur les 8,2% identifiés comme de la variabilité de l'efficacité alimentaire dans la variabilité de l'énergie nette ingérée, seulement 58,9% étaient réellement associés aux différences interindividuelles ; les 41,1% restants ne peuvent pas être associés à un effet spécifique de l'individu et peuvent encore correspondre à des erreurs de mesure, même dans des conditions expérimentales optimales. La précision et la fréquence des mesures réalisées, surtout des quantités ingérées, sont primordiales pour pouvoir interpréter la variabilité estimée comme la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire.

La contribution de la thèse à l'amélioration du phénotypage des variations des réserves corporelles est un résultat majeur. Ce phénotype restait jusqu'à présent difficile à mesurer à haut débit : les méthodes existantes étant soit inadaptées pour de grands effectifs, soit trop chronophages, soit trop subjectives pour du haut débit. La méthode développée dans le cadre de cette thèse est une méthode entièrement automatique basée sur l'estimation de la note d'état corporel par analyse de la forme tridimensionnelle du bassin de la vache. L'erreur de prédiction de cette méthode en validation externe est semblable à l'erreur de reproductibilité de la notation par palpation ou visuelle et est 1,4 fois plus répétable que la notation manuelle. Des améliorations relevant du matériel doivent être validées avant toute utilisation à haut débit. Cette preuve du concept ouvre des perspectives intéressantes de monitoring de la note d'état corporel à haut débit en élevage, mais des phases de développement sont encore nécessaires pour transposer ce prototype dans différents élevages et l'utiliser en routine.

La généralisation de ces résultats sur l'efficacité alimentaire reste cependant assez difficile car la définition des dépenses énergétiques à prendre en compte dans l'estimation de l'efficacité alimentaire est très variable dans la bibliographie. Les dépenses énergétiques non prises en compte se retrouvent dans le résidu du modèle, et sont donc assimilables à des

différences d'efficacité alimentaire. La place de chacun des mécanismes associés soit à un apport énergétique, comme la mobilisation des réserves corporelles, soit à une dépense énergétique est donc une question importante à se poser dans le cadre d'une analyse de l'efficacité alimentaire. Les principaux mécanismes pris en compte sont ceux associés à un produit direct en élevage, tel que le lait ou la viande, et ceux relevant de la qualité d'élevage, tel que la variation des réserves corporelles. Les mécanismes identifiés comme associés aux différences d'efficacité alimentaire dans cette thèse ne sont valables que pour le modèle d'estimation de l'efficacité alimentaire utilisé. La place de chacun de ces mécanismes soit comme déterminant soit comme un caractère d'intérêt pour l'élevage est à discuter au cas par cas.

Un dernier verrou qui a été identifié est la difficulté à estimer l'efficacité alimentaire en élevage, principalement parce que les quantités ingérées individuelles ne sont pas accessibles en élevage, surtout sur de longues périodes. Les résultats montrent qu'intra-lactation, pour des périodes comparées allant de la quinzaine à 5 mois consécutifs, l'estimation de l'efficacité alimentaire pouvait se restreindre à une durée de 2,5 mois consécutifs, de la 7^{ème} à la 11^{ème} quinzaine de lactation. L'étude de la répétabilité inter-lactations est cependant primordiale pour être sûr que l'estimation de l'efficacité ne peut se restreindre qu'à une lactation. Cette répétabilité donnerait sans doute une meilleure idée de ce que l'on peut attendre en termes d'héritabilité de ce caractère pour des vaches laitières. Il serait également indispensable de tester cette répétabilité entre des systèmes d'alimentation différents pour vérifier la robustesse de l'indicateur « ingéré résiduel ». Les résultats montrent aussi qu'il est possible d'estimer l'efficacité alimentaire et notamment d'identifier les vaches les plus efficaces sans passer par la mesure des quantités ingérées. L'indicateur indirect proposé est estimé à partir de données qui seront demain accessibles à haut débit en élevage : le volume de lait produit, le poids vif et la température ruminale. Ces résultats ont donc permis d'identifier des pistes pour rendre l'estimation de l'efficacité alimentaire accessible en élevage et d'envisager la possibilité d'une sélection sur ce caractère.

Annexes

Communications écrites

Fischer A, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2014. Améliorer la mesure de l'état des réserves corporelles des vaches laitières en analysant la surface 3D du dos de la vache. In 21ème Rencontres Recherches Ruminants, 03-04/12/2014, Paris, France, pp. 23-26.

Faverdin P and **Fischer A** 2016. Monitoring du poids et de l'état corporel. In Elevage de précision (eds. S Chastant-Maillard and M Saint-Dizier), pp. 125-144, Editions France Agricole, Paris, France.

Améliorer la mesure de l'état des réserves corporelles des vaches laitières en analysant la surface 3D du dos de la vache.

FISCHER A. (1, 2, 3), LUGINBUHL T. (4), DELATTRE L. (4), DELOUARD J-M. (4), FAVERDIN P. (1, 2)

(1) INRA UMR 1348 PEGASE, Domaine de la Prise, 35 590 Saint-Gilles, France

(2) Agrocampus-Ouest UMR 1348 PEGASE, 65 rue de Saint-Brieuc, 35 000 Rennes, France

(3) Institut de l'élevage, Monvoisin B.P. 85225, 35 652 Le Rheu, France

(4) 3DOUEST, 5 Rue de Broglie, 22 300 Lannion, France

RESUME

Chez la vache laitière, les réserves corporelles et leurs variations au cours de la lactation conditionnent les performances de production mais aussi indirectement de reproduction et le statut sanitaire. La difficulté réside dans la mesure précise, objective et à haut débit de ces phénotypes. La notation d'état corporel (NEC) est la méthode la plus utilisée en élevage : elle est simple, mais subjective et peu sensible. L'objectif du projet est de calibrer, valider et qualifier une estimation de la NEC à partir de l'information complète contenue dans l'image tridimensionnelle (3D) du bassin dorsale de la vache. La normalisation des surfaces passe par l'extraction manuelle de 4 points anatomiques du bassin. Les 57 surfaces-3D utilisées pour la calibration ont été projetées dans le repère défini par les composantes principales caractérisant l'ensemble de ces surfaces-3D. La NEC est estimée par régression linéaire multiple des coordonnées des surfaces sur ces composantes principales. La méthode est parfaitement calibrée sur la NEC et la validation externe met en évidence une erreur de prédiction de 0.3point de NEC ce qui correspond à la reproductibilité de la NEC de référence. La méthode ne semble pas moins efficace avec des vaches utilisées en calibration qu'avec des vaches externes à la calibration. La NEC en 3D apparaît 3 fois plus répétable et 2,8 fois plus reproductible que la NEC de référence. Cette méthode apparaît comme un outil encourageant pour améliorer la qualité du phénotypage de l'état corporel et le rendre accessible à haut débit en élevage

Analysing the 3D-surface of a dairy cow's back to improve assessment of body condition.

FISCHER A. (1, 2, 3), LUGINBUHL T. (4), DELATTRE L. (4), DELOUARD J-M. (4), FAVERDIN P. (1,2)

(1) INRA UMR 1348 PEGASE, Domaine de la Prise, 35 590 Saint-Gilles, France

(2) Agrocampus-Ouest UMR 1348 PEGASE, 65 rue de Saint-Brieuc, 35 000 Rennes, France

(3) Institut de l'élevage, Monvoisin B.P. 85225, 35 652 Le Rheu, France

SUMMARY

In dairy husbandry, changes in body reserves throughout lactation influence the cow's production, reproduction and health performance, and are therefore important to consider. Body condition scoring (BCS) is commonly used on-farm because it is easy-to-use. However, it is subjective, time-consuming and not sensitive enough. This project was aimed at developing, validating and qualifying a method to estimate BCS from a 3-dimensional surface of the cow's rear. The surfaces' processing needed to extract manually four anatomical benchmarks to get normalized 3D-surfaces. The variability of the shape of the 57 3D-surfaces used for calibration has been summarized by principal component analysis. The coordinates of these 3D-surfaces on their principal components are incorporated in a multiple linear regression to assess BCS. The method was perfectly calibrated on BCS and the external validation showed that the prediction error was 0.31 points of BCS, which is equivalent to the reproducibility of BCS used as a reference. The method was not less efficient when using cows not used for the calibration than when using cows used for the calibration. 3D-BCS is three times more repeatable and 2.8 times more reproducible than manual BCS. Assessing body condition thanks to 3D pictures appears to be a promising tool, which can improve its value for phenotyping and its wider use on farms.

INTRODUCTION

Les réserves corporelles constituent chez la vache laitière un élément important de la régulation de l'énergie. L'état de ces réserves et leur variation au cours de la lactation conditionnent les performances de production, de reproduction et de santé. La sélection génétique sur la production laitière a accru la sollicitation des réserves en début de lactation. Le suivi de l'état des réserves corporelles constitue un phénotype d'intérêt, d'une part parce qu'il reflète les performances de production, reproduction et santé et d'autre part parce qu'il permet d'estimer le bilan énergétique de l'animal quand il est complété par le poids vif (Thorup et al., 2012).

Le phénotypage à haut-débit de précision de l'état corporel des vaches laitières souffre de l'absence de méthode de mesure utilisable à haut débit combinant objectivité, précision et simplicité : soit les méthodes sont relativement précises et objectives mais trop lourdes ou trop chères (dissection anatomique, espace de diffusion de l'eau lourde), soit les méthodes sont simples, rapides mais subjectives et peu

sensibles, telle que la note d'état corporel (NEC). La NEC est la méthode utilisée en élevage ; elle est attribuée par des experts selon une grille de notation.

L'essor récent des technologies d'imagerie a été mis à profit pour automatiser la NEC et par conséquent la rendre objective et plus répétable. L'idée est de mettre en lien un indicateur de la forme, majoritairement du bassin de la vache, avec la NEC. Les meilleurs résultats de calibration ont été obtenus par la calibration de la NEC sur l'écart entre la forme du contour du bassin et le contour moyen obtenu sur la population de calibration (Azzaro et al., 2011). Pour exploiter toute la variabilité disponible dans la forme du bassin et ne pas se restreindre à une dimension unique telle qu'un angle ou une surface (Bewley et al., Halachmi et al., 2008), nous avons choisi d'extraire le maximum de variabilité des formes en ne gardant qu'un minimum de dimensions grâce à une analyse en composantes principales (ACP).

Plus récemment, Weber et al. (2014) ont testé l'intérêt d'utiliser des images en 3D : l'analyse de forme se restreignait précédemment aux 2 premières dimensions. En incluant la

3^{ème} dimension, l'analyse de forme est réalisée sur toute la variabilité accessible dans l'espace. Les corrélations obtenues sont aussi bonnes que celles des travaux réalisés en 2D.

L'objectif de ce travail est de développer avec l'aide d'experts en imagerie (3DOuest, Lannion) une estimation de la NEC à partir de l'information complète décrite par ACP contenue dans la surface-3D du bassin de la vache. Peu de travaux ont totalement décrit la méthode en termes de validation et de qualification. Le développement de la méthode combine : 1/ la faisabilité de calibrer l'information 3D sur la NEC, 2/ affiner la définition du modèle utilisé et 3/ qualifier la méthode en termes de validation, répétabilité et reproductibilité.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le système d'acquisition 3D est fixé à la sortie de la salle de traite à l'entrée de la stalle de pesée automatique de manière à scanner toutes les vaches en lactation automatiquement et facilement après la traite. Le capteur est placé à 2m du sol pour scanner la surface comprise entre les pointes de hanches et les pointes de fesses des vaches. Cette surface correspond aux surfaces anatomiques couramment utilisées pour la NEC et est facile d'accès pour une caméra. La fermeture des portes de la station de pesée déclenche l'acquisition de la surface et l'ouverture réinitialise le capteur pour la prochaine acquisition. Le capteur balaye la vache des pointes de hanche vers les pointes de fesses en 3 secondes en prenant 30 images par seconde. La superposition de ces 90 images donne une surface-3D de haute définition, automatiquement enregistrée sur l'ordinateur avec la date et l'heure d'acquisition.

En pratique, les vaches en lactation sont scannées une fois par semaine et sont notées une fois par mois le même jour que l'acquisition 3D, d'après la grille de NEC définie par Bazin et Augéard (1984). Les NEC vont de 0 pour une vache maigre à 5 pour une vache grasse, espacées de 0.25 point. La NEC finale est la moyenne des NEC attribuées par chacun des 3 experts, qui sont régulièrement recalibrés pour être habilités à cette notation.

1.2. NORMALISATION DES SURFACES-3D

Pendant l'acquisition, les vaches sont immobilisées dans la stalle de pesée, mais ne sont pas exactement dans la même position à chaque scan. Par conséquent, la surface réellement scannée par le capteur 3D varie d'une vache à l'autre et d'une pesée à l'autre en fonction de la position de la vache. Avant la calibration de l'information 3D sur la NEC, les surfaces 3D sont normalisées : c'est l'étape qui permet d'extraire l'information partagée par toutes les surfaces et qui rend les surfaces comparables. La normalisation passe ici par un alignement des axes de la colonne vertébrale et du plan moyen des surfaces-3D, puis par un redimensionnement qui ajuste à un même gabarit toutes les surfaces pour éviter toute confusion entre la taille et la NEC (voir 1.2.1). Certaines zones anatomiques n'étant pas toujours bien accessibles à la caméra, une superposition des surfaces pour extraire les points 3D présents sur toutes les surfaces a été nécessaire pour identifier les points de la surface-3D qui sont à considérer (voir 1.2.2).

1.2.1. Alignement et redimensionnement des surfaces-3D

Les surfaces-3D sont à l'origine numérisées dans le référentiel du capteur situé à 2 m du sol. Un nouveau repère centré sur le bassin de la vache entre les pointes de hanche est défini à partir de 4 points : la pointe de hanche droite et gauche et 2 points à la base de la queue de part et d'autre de la colonne vertébrale (Figure 1). Ces 4 points sont extraits manuellement sur chaque surface. Les coordonnées moyennes sur la population destinée à la calibration sont estimées pour chacun des 4 points identifiés. Chaque surface-3D subit une transformation qui l'étire ou la compresse, pour qu'après transformation les coordonnées des 4 points soient égales aux

coordonnées moyennes. Toutes les surfaces-3D ainsi traitées ont leurs 4 points de référence avec les mêmes coordonnées.

1.2.2. Superposition des surfaces-3D

Les surfaces-3D alignées et redimensionnées sont superposées les unes sur les autres pour trouver la surface commune à toutes les surfaces-3D utilisées pour la calibration. Cette surface commune, appelée masque des surfaces, est découpée en une grille de 150x150, c'est-à-dire 22 500 pixels. Chaque surface est décrite au maximum par 22 500 pixels dans les 3 dimensions de l'espace, c'est-à-dire au maximum par 67 500 dimensions ; les pixels vides n'étant pas conservés.

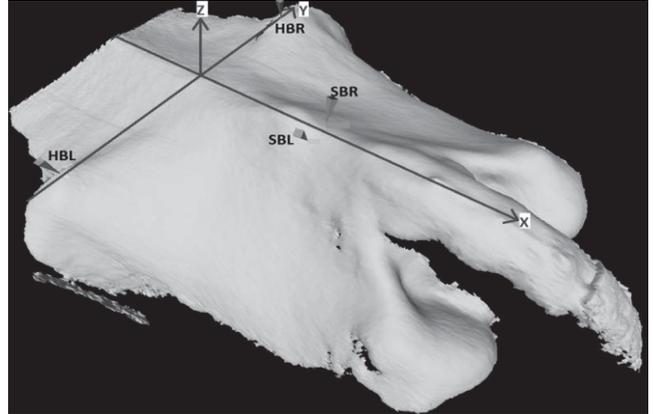


Figure 1 : Caractérisation du repère défini par 2 points aux pointes de hanches (HBR et HBL) et 2 points à la base de la queue (SBR et SBL) pour la normalisation des surfaces-3D.

1.3. RESUMER LA VARIABILITE DES FORMES PAR ACP

Une ACP est réalisée sur l'ensemble des surfaces destinées à la calibration pour résumer la variabilité des formes 3D avec le moins de dimensions possible. Chaque surface-3D devient une combinaison linéaire des vecteurs propres de l'ACP, dont le nombre ne dépasse pas le nombre d'individus utilisés pour la calibration.

1.4. ESTIMATION DE LA NEC PAR L'INFORMATION 3D

1.4.1 La calibration

La NEC mesurée manuellement d'après la grille de notation est modélisée par régression linéaire des coordonnées des surfaces-3D sur les vecteurs propres de l'ACP. Le meilleur modèle est sélectionné par stepwise en minimisant l'AIC (Akaike Information Criterion) et le nombre de variables. Pour toute nouvelle surface-3D, la surface-3D est au préalable normalisée et projetée sur les vecteurs propres de l'ACP (voir 1.2 et 1.3). Les coordonnées sur ces vecteurs propres sont remplacées dans le modèle de calibration pour estimer la NEC.

1.4.2 La validation

La validation consiste à estimer la capacité du modèle à estimer avec précision la NEC mesurée par les experts sur des surfaces-3D hors calibration. L'erreur moyenne standard de prédiction (MSEP) est calculée comme la somme du biais au carré qui correspond à l'écart au carré entre la NEC moyenne mesurée et la NEC moyenne estimée par la 3D, de l'erreur de pente qui reflète la corrélation de la pente de la régression de NEC en fonction de NEC-3D avec 1 et de l'erreur inexpliquée qui reflète la corrélation entre les variations de NEC et de NEC-3D. Cette validation est réalisée sur 2 populations de surfaces-3D : une constituée de vaches présentes dans la calibration, mais prises à un stade différent, « valididem », et une constituée de vaches externes à la calibration, « validiff », pour tester la robustesse de la population de calibration.

1.4.3 La répétabilité et reproductibilité

L'analyse de la qualité de la méthode est complétée par l'estimation de la **répétabilité** et **reproductibilité** de la

méthode. L'objectif est d'évaluer l'erreur réalisée lors d'estimations successives de la NEC à partir de la même surface-3D normalisée 8 fois de suite par le même opérateur pour la répétabilité et à partir de la même vache scannée 8 fois de suite le même jour pour la reproductibilité. Deux analyses de la variance (ANOVA) sont réalisées, une pour la répétabilité et une pour la reproductibilité, pour corriger la variabilité des NEC obtenues de la variabilité du facteur associé au choix des vaches. La répétabilité et la reproductibilité s'évaluent respectivement avec le coefficient de variation de répétabilité (CV_r) et de reproductibilité (CV_R) estimées à partir des résidus des ANOVA.

$$CV_r = \frac{\sigma_r}{M_r} \times 100 \quad CV_R = \frac{\sigma_R}{M_R} \times 100$$

Avec σ_r et σ_R les écart-types des NEC-3D résiduelles des ANOVA respectivement de répétabilité et de reproductibilité ; M_r and M_R les moyennes des NEC-3D résiduelles des ANOVA respectivement de répétabilité et de reproductibilité. De la même manière, la répétabilité et la reproductibilité de la NEC manuelle sont calculées sur les résidus des modèles d'ANOVA contenant le facteur « vache » pour la répétabilité et les facteurs « vache » et « expert » pour la reproductibilité. La NEC-3D est d'autant plus répétable (reproductible) que le CV_r (CV_R) est petit.

1.5. POPULATIONS UTILISEES

Toutes les vaches en lactation ont été scannées en 3D une fois par mois de mars à juillet 2013 le même jour que la NEC au moment de la traite du soir. Cette base a été enrichie avec les surfaces-3D de vaches tariées scannées 2 fois en 3 mois car elles ont des NEC très élevées et permettent d'enrichir une population de calibration pour avoir une large distribution de NEC, poids vif, parité et stade de lactation. Dans cet esprit, 57 surfaces-3D constituent la population de calibration avec la NEC comprise entre 0,5 et 4,8 et une moyenne à 2,2. Par ailleurs, 25 surfaces-3D avec une NEC entre 0,8 et 4,8 et une moyenne de 2,3 constituent la population « valididem », et 25 surfaces-3D avec une NEC entre 0,8 et 2,9 et une moyenne de 1,8 constituent la population « validdiff ». Enfin, 6 surfaces-3D avec des NEC réparties régulièrement entre 1,1 et 4,8 constituent la population pour la répétabilité et reproductibilité (Figure 2).

2. RESULTATS

2.1. UN SYSTEME D'ACQUISITION FONCTIONNEL

Le même prototype a été utilisé pendant toute la période. Un scan complet de l'enregistrement dure 4 secondes. Chaque scan résulte toujours en une surface-3D enregistrée. Au total, 10% des surfaces-3D obtenues ont été supprimés de l'étude parce qu'elles n'étaient pas lisses. Ces discontinuités de surface sont liées à un mouvement trop important des vaches pendant l'acquisition. De mars à juillet 2013, nous avons enregistré 1 433 surfaces-3D. Pour définir les différentes populations utilisées (voir 1.4), nous avons choisi 180 surfaces-3D sur les 1 433 enregistrées. L'objectif de cette sélection est d'avoir un nombre minimum de surfaces-3D à traiter pour, dans une 1^{ère} approche, minimiser le temps consacré à l'extraction manuelle des 4 points tout en décrivant une gamme de NEC, poids vif, stade de lactation et parité la plus large et exhaustive possible.

2.2 LE MEILLEUR MODELE DONNE UNE CALIBRATION PARFAITE

L'ACP réalisée sur les 57 surfaces-3D de la population de calibration est caractérisée par 57 vecteurs propres. Chaque surface-3D est une combinaison linéaire des 57 vecteurs propres. Le meilleur modèle de régression linéaire sélectionné par stepwise comporte 55 variables, associées à 55 vecteurs propres de l'ACP. Ce modèle explique 100% de la variabilité de la NEC ($R^2 = 1$) avec une erreur très proche de 0 (SD = 0) pour la population de calibration.

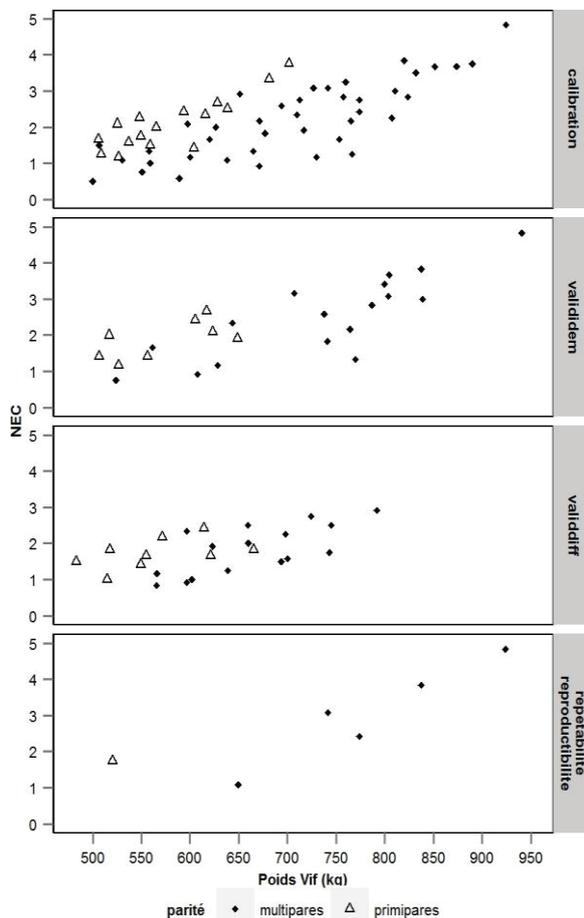


Figure 2 : Description des 4 populations de vaches utilisées : calibration, « validdiff », « valididem » et répétabilité / reproductibilité.

2.3 UNE METHODE VALIDE, REPETABLE ET REPRODUCTIBLE

La NEC-3D, NEC estimée par le modèle 3D, est très corrélée à la NEC mesurée par les experts aussi bien pour la population « valididem » ($r = 0,96$) que « validdiff » ($r = 0,89$). La MSEP est de 0,09 et 0,10 point de NEC respectivement pour « valididem » et « validdiff ». La variabilité de cette erreur reste inexpliquée à hauteur de 70,3 % et 95,4 % respectivement pour « validdiff » et « valididem », les 29% complémentaires étant expliqués par un biais de pente (Figure 3).

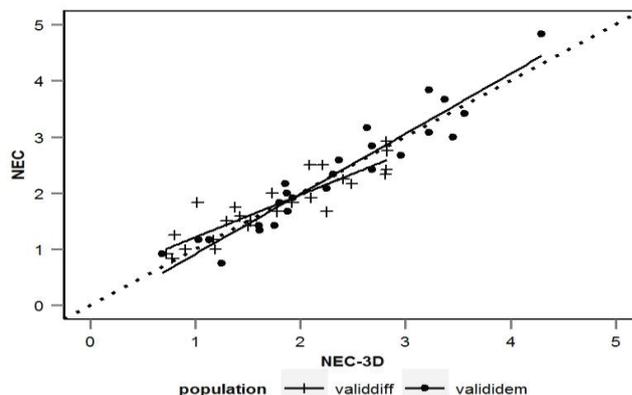


Figure 3 : Qualité de l'estimation de la NEC par 3D sur les populations de validation externe: "valididem" et "validdiff".

L'erreur de répétabilité de la NEC-3D est de 0,075 et l'erreur de reproductibilité est de 0,103 point de NEC (Tableau 1). Le système d'acquisition et le traitement des surfaces-3D sont associés à une erreur égale à 4% de la variation observée de

la NEC en 3D. La NEC en 3D ressort 2,8 fois plus répétable et reproductible que la NEC manuelle.

Tableau 1 : Répétabilité et reproductibilité de l'estimation de la NEC par 3D (NEC-3D) et de la NEC manuelle.

Méthode	σ_r	σ_R	CV_r	CV_R
NEC-3D	0,075	0,103	2,91	3,95
NEC	0,210	0,280	10,05	13,44

3. DISCUSSION

3.1 UN SYSTEME D'ACQUISITION FONCTIONNEL

Le système d'acquisition développé par 3DOuest est aussi efficient que les systèmes utilisés dans des travaux précédents : le capteur 3D n'était ni sensible aux variations de lumière (Bewley et al., 2008) ni aux changements d'humidité (Azzaro et al., 2011). Un nombre plus important de surfaces ont pu être conservées pour l'étude : 80% des surfaces collectées alors que Bewley et al. (2008) et Azzaro et al. (2011) n'ont conservé respectivement que 23% et 2,75% des images collectées.

3.2 UNE METHODE PERFORMANTE 2,8 FOIS PLUS REPETABLE ET REPRODUCTIBLE QUE LA NEC

Le modèle retenu pour estimer la NEC à partir de la 3D est décrit par un R^2 de 1 et un écart-type de 0 : il explique donc toute la variabilité de la NEC dans la population de calibration. L'erreur résiduelle de 0 soulève la question de surparamétrisation du modèle : les dernières variables insérées dans le modèle sont peut-être liées à des caractéristiques spécifiques à certaines surfaces-3D et ne sont en aucun cas des caractéristiques globales de la population. Les 2 populations de validation témoignent d'une erreur de prédiction équivalente. La méthode ne semble pas témoigner d'une plus grande sensibilité pour les vaches déjà utilisées pour la calibration à un stade de lactation différent que pour des vaches externes à la calibration. Le biais de pente est légèrement plus grand pour « validiff » : le modèle est probablement surparamétré mais la qualité de la validation n'en est pas affectée.

La corrélation entre la NEC estimée par 3D et la NEC manuelle est similaire à celle obtenue par Halachmi et al. (2013) avec des images 2D ($r = 0,94$). Les différences peuvent aussi s'expliquer par les différences de conditions expérimentales (grille de notation de l'état corporel, caractéristiques de la population choisie).

L'erreur de prédiction obtenue en validation est similaire aux erreurs obtenues par Azzaro et al. (2011) qui compare leur méthode avec celle de Bewley et al. (2008) et Halachmi et al. (2008). Cette erreur réalisée en validation externe est l'erreur moyenne réalisée pour une mesure de NEC-3D pour une vache hors calibration. Elle inclut l'erreur réalisée par la méthode de référence, la NEC. La calibration de l'information 3D sur une méthode plus précise telle que l'espace de diffusion de l'eau lourde pourrait réduire cette erreur mais est trop coûteuse. Un compromis serait de calibrer sur la mesure de l'épaisseur de tissu sous-cutané qui est plus abordable, et qui reste plus précise et moins subjective que la NEC.

Les études déjà réalisées autour de la calibration d'une information extraite d'image du bassin de la vache sur un indicateur d'état corporel n'ont pour la plupart décrit que la calibration. La validation et la qualification par répétabilité et reproductibilité sont essentielles pour entièrement qualifier et décrire la méthode. La NEC-3D est 2,8 fois plus répétable et reproductible que la méthode de référence, la NEC. Chaque mesure de NEC-3D contient une erreur de 0,1 point de NEC qui est liée à la méthode (traitement des surfaces et modèle).

3.3 L'APPRENTISSAGE DE FORME PAR ACP : UNE TECHNIQUE EFFICIENTE

L'analyse par ACP est plus flexible que l'utilisation de critères spécifiques prédéfinis. Le développement d'une méthode dont l'analyse est basée sur un nombre réduit de critères spécifiques est risqué comme première approche car ces critères ne sont pas obligatoirement les meilleurs pour prédire le caractère à décrire. L'ACP permet d'étudier le maximum de la variabilité existante dans le caractère d'intérêt, ici la forme 3D, avec un minimum de dimensions. Les méthodes d'apprentissage par ACP réalisées sur l'information globale contenue dans ce caractère d'intérêt minimisent ce biais. Comme notre méthode est basée sur l'ensemble de l'information disponible dans la forme 3D, et pas sur un critère spécifique, la méthode devrait être facilement adaptable à d'autres races ou systèmes de notations. L'adaptation passe par la définition d'une population de calibration adaptée, puis avec une ACP par la définition des vecteurs propres adaptés à cette population pour définir le modèle qui estime la NEC à partir des coordonnées des surfaces-3D sur les vecteurs propres.

3.4 L'AUTOMATISATION DE L'EXTRACTION DES 4 POINTS : DEVELOPPEMENT ESSENTIEL DE LA NEC-3D

La normalisation des surfaces passe par l'extraction de points anatomiques. Le nombre de points extraits par surface a été divisé par 8 par rapport aux 23 identifiés par Bewley et al. (2008), ce qui réduit considérablement le temps d'extraction. Néanmoins l'extraction a été réalisée manuellement et nécessite en moyenne 3 minutes par surface. L'automatisation est essentielle pour accéder à des mesures à haut débit de la NEC-3D. De plus, elle supprimerait totalement l'intervention humaine dans le traitement des surfaces et réduirait par conséquent l'erreur de répétabilité, donc de reproductibilité de la méthode. Comme les résultats de la méthode démontrent la faisabilité du concept et que le nombre de points à extraire est minimal, l'automatisation de l'extraction des 4 points est envisageable et envisagée pour la prochaine étape de développement.

CONCLUSION

L'estimation de la NEC à partir de la surface en 3D du bassin de la vache résumé par une ACP est performante et 2,8 fois plus répétable que la NEC manuelle. L'automatisation totale du traitement des surfaces-3D est essentielle avant d'envisager une utilisation de cette méthode prometteuse pour faire du monitoring en élevage.

Les auteurs remercient l'équipe de l'installation expérimentale INRA-UMR PEGASE de Méjusse pour leur investissement dans les mesures, l'UMT RIEL pour les échanges riches sur le sujet et le soutien financier du département INRA PHASE.

Azzaro G., Caccamo M., Ferguson J. D., Battiato S., Farinella G. M., Guarnera G.C., Puglisi G., Petriglieri R., Licitra G., 2011. Journal of Dairy Science, 94, 2126-2137.

Bazin S., Augéard P., 1984. Institut technique de l'Élevage bovin pour le Réseau national d'Expérimentation et des Démonstrations en Élevage bovin.

Bewley J. M., Peacock A. M., Lewis O., Boyce R. E., Roberts D. J., Coffey M. P., Kenyon S. J., Schutz M. M., 2008. Journal of Dairy Science, 91, 3439-3453.

Halachmi I., Polak P., Roberts D. J., Klopčic M., 2008. Journal of Dairy Science, 91, 4444-4451.

Halachmi I., Klopčic M., Polak P., Roberts D. J., Bewley J. M., 2013. Comput. Electron. Agric., 99, 35-40.

Thorup V.M., Edwards D., Friggens N.C., 2012. Journal of Dairy Science, 95, 1784-1793.

Weber A., Salau J., Haas J. H., Junge W., Bauer U., Harms J., Suhr O., Schönrock K., Rothfuß H., Bielecki S., Thaller G., 2014. Livestock Science

Monitoring du poids et de l'état corporel

9

Philippe Faverdin^{1, 2}, Amélie Fischer^{1, 2, 3}

Points forts

- Les nouvelles technologies permettent un suivi automatisé du poids et de l'état corporel qui n'étaient connus que ponctuellement auparavant.
- Ces mesures fréquentes de poids et d'état corporel permettent d'accéder à des informations sur la croissance, les variations de quantités ingérées, le bilan énergétique et ses variations.
- Ces informations peuvent aider l'éleveur dans la conduite de l'alimentation et dans la gestion des problèmes de santé et de reproduction.
- Ces mesures automatisées nécessitent cependant de nouvelles méthodes de travail pour les vérifier, les interpréter et les intégrer dans les processus de décision.

Les nouvelles technologies revisitent actuellement l'appréciation du poids et de l'état corporel des animaux d'élevage, caractères à la base de l'élevage. L'apparition de nouvelles méthodes permettant d'augmenter la fréquence et la précision des mesures va offrir des perspectives originales dans le domaine émergent de l'élevage de précision.

Le poids vif des animaux et leur état corporel sont depuis longtemps des caractères essentiels pour la conduite de l'élevage. La production de viande est une des productions majeures de l'élevage. L'estimation du poids des animaux et le suivi de leur croissance constituent des indicateurs précieux de la conduite d'élevage (suivi de la croissance des animaux, gestion des périodes de mise à la reproduction, indicateurs de l'état sanitaire des animaux), de la qualité de l'alimentation et pour la sélection des animaux. « *Seule la pesée régulière du bétail donnera des indications sérieuses sur un accroissement normal des animaux* », écrivait déjà le *Larousse agricole* de 1920 à propos de la bascule, ajoutant que « *la bascule est de toute nécessité dans une exploitation intelligemment gérée* » [9.1]. Ces recommandations restent vraies encore aujourd'hui et, après une longue période où les techniques n'ont que peu progressé, des avancées importantes ont été réalisées ces dernières années et ouvrent des pistes intéressantes pour revisiter ces phénotypes dans les élevages de demain.

1. INRA, UMR 1348 PEGASE, domaine de la Prise, 35590 Saint-Gilles, France.

2. Agrocampus-Ouest, UMR 1348 PEGASE, 65, rue de Saint-Brieuc, 35000 Rennes, France.

3. Institut de l'élevage, Monvoisin, BP 85225, 35652 Le Rheu Cedex, France.

Enjeux de la mesure du poids vif et de l'état corporel

Suivi de la croissance

L'évolution du poids vif des animaux en croissance est un indicateur très intégré de la qualité de l'élevage et est souvent traduite en gain moyen quotidien (GMQ). Une croissance rapide moyenne des animaux attestera de la qualité de la ration et du bon état de santé des animaux. Des ruptures dans la courbe de croissance constituent des alertes pour l'éleveur et pourront, par exemple, l'inciter à revoir l'équilibre de la ration. Les courbes de croissance des animaux au sein d'un troupeau sont souvent très hétérogènes. Cette hétérogénéité des croissances est difficile à gérer en élevage, d'une part pour satisfaire une demande de carcasses très homogènes pour les abattoirs, comme c'est le cas en élevage de porcs, et d'autre part pour gérer la mise à la reproduction en groupe. Néanmoins, cette hétérogénéité est intéressante pour la sélection génétique. Le suivi de la croissance va également donner des renseignements sur l'adiposité des carcasses : pour un type d'animal donné, une augmentation du gain de poids vif nécessite une alimentation plus énergétique, qui se traduit en général par un dépôt de lipides plus important. Chez les femelles reproductrices, le poids des jeunes femelles de renouvellement est un indicateur de maturité souvent préférable à l'âge pour les décisions de mise à la reproduction. Le suivi précis de la croissance des animaux constitue donc un outil précieux de suivi technique d'un élevage.

Qualité des carcasses et valeur bouchère des animaux

Au-delà du poids, la maîtrise de la qualité des carcasses est une composante essentielle à intégrer dans la conduite d'élevage. Cette qualité est généralement évaluée à partir de deux critères assez subjectifs : la conformation (grille E, U, R, O, P en bovins, ovins et porcins) et l'engraissement des carcasses (note de 1 à 5 en fonction de l'adiposité chez les bovins [9.2]). En bovins, sauf dans des types génétiques sélectionnés pour de forts développements musculaires mais avec de faibles dépôts adipeux, les carcasses trop maigres ont tendance à faire baisser le rendement carcasse et le persillé des viandes. À l'opposé, des carcasses trop grasses seront aujourd'hui jugées moins intéressantes, principalement parce que le gras animal n'est plus autant recherché. L'accessibilité à l'estimation de ces aptitudes bouchères avant l'abattage des animaux est donc importante pour les éleveurs. Elle leur permettrait d'adapter plus finement les dates d'abattage en fonction de l'état d'engraissement des animaux et ainsi de mieux répondre à la demande en termes de qualité.

Maîtriser les variations des réserves corporelles : bien-être, santé et reproduction

Chez les femelles reproductrices, l'état corporel n'intervient pas seulement dans le cadre de la valeur bouchère des animaux, mais également et surtout dans les aptitudes d'élevage de celles-ci, que ce soit pour la santé, la reproduction ou le bien-être [9.3]. Les femelles trop maigres ou ayant subi une trop forte chute en état corporel vont présenter de faibles

taux de réussite lors de la mise à la reproduction et une moindre résistance aux maladies. À l'inverse, des femelles trop grasses peuvent présenter des difficultés au moment de la mise-bas (truiés, vaches, chèvres) et développer davantage de maladies métaboliques (stéatose hépatique, acétonémie...) après la mise-bas. De nombreux pays proposent aujourd'hui des recommandations pour la conduite des animaux en fonction de leur état corporel. En Nouvelle-Zélande, les décisions de tarissement et d'alimentation autour du vêlage des vaches laitières sont assez largement conditionnées par l'évaluation de l'état corporel des vaches à ces stades critiques. Ces associations entre caractères zootechniques et état des réserves corporelles motivent actuellement la prise en compte de l'état d'engraissement dans le calcul de l'index génétique et demain celle de ses variations après mise-bas chez les femelles laitières pour améliorer les performances de reproduction et de santé des vaches tout en conservant un niveau de production élevé [9.4, 9.5].

Poids vif : une mesure faussement simple qui le devient !

Encadré 9.1

Quelques définitions

Composantes du poids vif : une mesure, plusieurs sources de variations

Le poids vif d'un animal est une mesure synthétique composée du cumul du poids de quatre composantes (figure 9.1) : les contenus digestifs, la masse lipidique, la masse délipidée ou masse maigre et enfin la masse osseuse. Les variations de poids vif peuvent concerner différemment ces quatre compartiments suivant les sources de variations considérées : l'âge, la race, les caractéristiques génétiques de l'individu et l'alimentation. Les contenus digestifs constituent une masse particulièrement importante chez les ruminants, en relation avec la taille des préestomacs. Ces contenus digestifs varient avec les quantités ingérées et sont plutôt perçus comme une source de bruit perturbant les informations intéressantes sur le poids de l'animal sans son contenu digestif.

État corporel

C'est un indicateur de l'état des réserves corporelles de l'animal à un instant donné. En cas d'excès énergétique, l'animal stocke l'énergie sous forme de réserves corporelles. Chez les mammifères terrestres, l'énergie est majoritairement stockée dans le tissu adipeux sous forme de triglycérides. Typiquement, les animaux forts producteurs de lait sont aussi des animaux dont l'état corporel varie beaucoup au cours de la lactation : par exemple, les vaches laitières mobilisent beaucoup de réserves corporelles en début de lactation et les reconstituent en fin de lactation et au tarissement.

Bilan énergétique

À l'échelle de l'animal, c'est le bilan entre l'apport d'énergie sous forme alimentaire et les dépenses énergétiques associées aux fonctions d'entretien, de croissance, de gestation et de production. Un bilan positif indique que l'animal mange plus d'énergie que celle dont il a besoin pour les fonctions biologiques. Inversement, un bilan négatif indique que l'animal est en déficit énergétique : il ne consomme pas assez d'énergie par l'alimentation pour couvrir ses besoins.

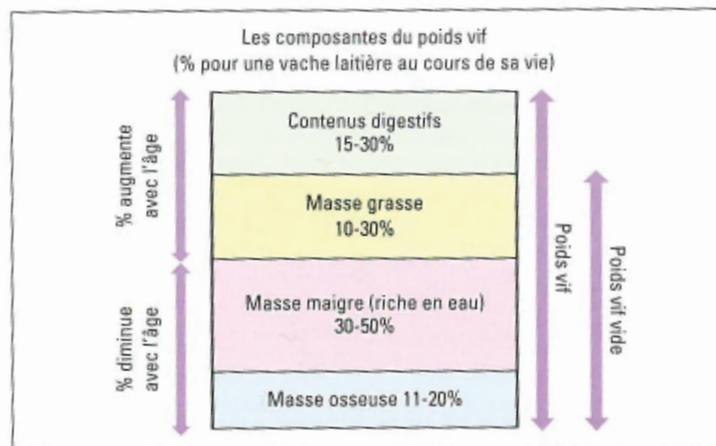


Figure 9.1 Les composantes du poids vif (en % du poids vif) pour une vache laitière et leur évolution au cours de sa vie

D'après Chilliard et al., 1983 [9.6].

La pesée est une opération apparemment simple, résolue depuis des siècles par des systèmes qui n'ont pas cessé de gagner en précision. La pesée pose cependant des problèmes qui ne sont pas liés qu'aux instruments de mesure, mais avant tout aux actions associées à la pesée telles que la manipulation des animaux, l'identification des animaux et l'enregistrement du poids. Des investissements complémentaires (barrière et portes de contention, identification...) sont nécessaires pour mesurer le poids vif et représentent souvent un coût supérieur au plateau de pesée lui-même. Pour qu'un poids soit validé, les constructeurs de plateau de pesée ont ajouté une contrainte de stabilité du poids: ce dernier doit être stable pendant un temps donné durant la pesée de l'animal pour qu'il soit enregistré. Si l'animal est trop agité, le poids est fortement instable, conduisant soit à aucun enregistrement de poids, soit à un poids aberrant. En pratique, pour éviter ce problème, les animaux sont accoutumés au dispositif lors des premières pesées. En élevage bovin, la mesure du poids reste encore peu pratiquée en routine et se limite aux périodes critiques, notamment à cause de l'importance de l'investissement (matériel et humain). Pour pallier ces limites de la pesée des animaux, des solutions simplifiées ont également été proposées pour effectuer des estimations de poids sans avoir recours à un système de pesée: ce sont les systèmes de pesée indirecte.

Mesure directe du poids vif: de l'arrivée de l'électronique à l'automatisation

Les systèmes de pesée ont connu deux révolutions: celle de l'automatisation de la mesure du poids et celle de l'automatisation complète du monitoring du poids.

La première révolution dans la pesée est venue avec l'apparition des capteurs électroniques de pesée liée au développement des jauges de déformation (encadré 9.2). En pratique,

Encadré 9.2**Le principe de base de la pesée électronique**

Une masse est posée ou accrochée à un corps d'épreuve. L'application d'une masse déforme le corps d'épreuve. Pour quantifier cette déformation, une jauge est fixée de façon très rigide sur le corps d'épreuve. La jauge subit la même déformation que le corps d'épreuve et permet de traduire la déformation physique du corps d'épreuve en variation de résistance électrique. C'est cette variation de résistance entre l'état initial (R_0) et la pesée (R) qui est associée à une variation de masse (figure 9.2). Comme la résistance à l'état initial est prise comme référence, il faut que le corps d'épreuve soit élastique : il doit revenir à l'état initial après une déformation. Quand la résistance électrique après application de la masse est stable, le poids associé est dit « stabilisé ».

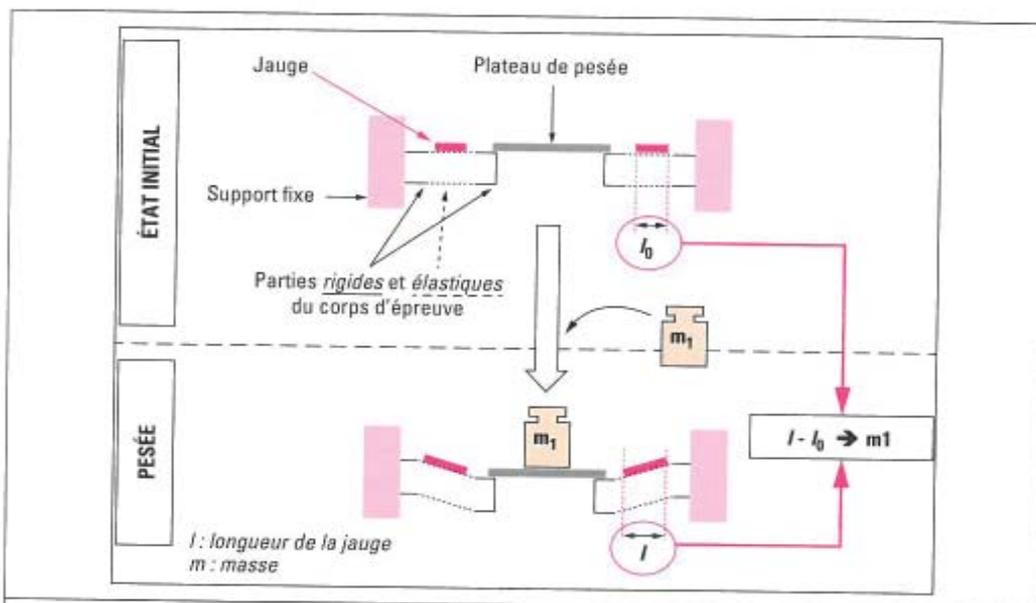


Figure 9.2 Principe de la pesée électronique

cette première étape permet d'obtenir instantanément le poids stabilisé de l'objet pesé, sans avoir à équilibrer les masses. L'identification et le management des animaux sont à ce stade encore manuels.

La seconde étape n'est apparue que depuis quelques années, mais elle va marquer un changement important dans le monitoring du poids. Les animaux passent seuls sur le dispositif de pesée, sont identifiés automatiquement (voir chapitre 3) et les poids sont directement transférés vers un système d'information. La pesée peut se faire en flux continu des animaux pour fluidifier leur circulation [9.7], ou en flux statique lorsque les animaux stationnent sur la balance, séparés des autres par des portes automatiques, pour mieux stabiliser le poids. En volailles, les animaux peuvent se percher sur des plateaux peseurs

suspendus qui permettent de contrôler la prise de poids moyenne du lot. À ce stade, il devient possible de peser les animaux quotidiennement, voire plus souvent, à condition que le dispositif soit situé sur un trajet que les animaux réalisent fréquemment. Par exemple, en systèmes de porcs à l'engrais, la pesée peut être réalisée sur le chemin à l'alimentation, et en systèmes de vaches laitières, elle peut être adaptée au parcours d'accès à la salle de traite ou au sein du robot de traite. Ces systèmes sont bien acceptés par les animaux, après une période d'accoutumance. Au cours d'une traite robotisée, le poids de la vache diminue presque en continu pendant que la mamelle se vide et nécessite l'utilisation d'un modèle pour estimer le poids le plus intéressant [9.8] (figure 9.3). En élevage porcin, l'utilisation d'une stalle de pesée automatique peut s'accompagner de problèmes sanitaires, du fait du passage d'un grand nombre d'animaux par un même endroit [9.9].

Comme pour tout dispositif automatique, il reste indispensable de vérifier régulièrement le bon fonctionnement du système et la qualité de la pesée, ce qui pour l'instant n'est pas automatique dans les élevages et nécessite une surveillance spécifique (vérification de la tare, cohérence des poids obtenus et utilisation de masses étalons représentatives de la gamme de poids à peser, de l'ordre de plusieurs centaines de kg pour les bovins).

Les systèmes de pesée en continu offrent une réelle plus-value dans la mesure où ils permettent de réaliser la pesée pratiquement sans intervention humaine et ouvrent l'accès à des fréquences élevées de mesures. Le challenge sera de tirer profit de cette nouvelle information pour le monitoring en élevage.

Estimation indirecte du poids vif

L'utilisation des balances étant souvent peu accessible en élevage, des méthodes alternatives ont été développées, en particulier chez les porcs et les bovins. Généralement ces

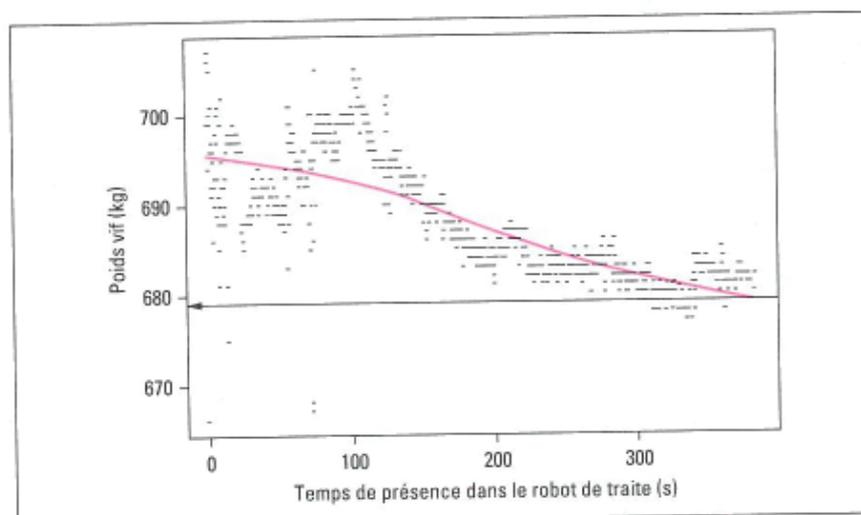


Figure 9.3 Un exemple d'une cinétique de mesures de poids vif (kg) pendant une traite avec un robot pour une vache laitière

La ligne horizontale indique le poids vif en fin de traite. D'après Friggens *et al.*, 2011 [9.8].

méthodes sont fondées sur le lien existant entre le poids vif d'un individu et sa morphologie. Les méthodes de barymétrie ont ainsi été mises au point pour estimer le poids vif à partir de certaines mensurations de l'animal, comme celle du périmètre thoracique ou tour de poitrine, qui reste l'une des plus simples et des plus courantes pour les bovins et les porcs. Des modèles simples permettent ensuite d'estimer le poids vif de l'animal en kg à partir de ces mensurations, comme le modèle de Crevat [9.10]. La méthode a parfois été simplifiée pour l'utilisateur en convertissant directement les longueurs en poids à l'aide d'un ruban spécial. Ces techniques très simples de mesure du poids sont encore souvent utilisées aujourd'hui en France et dans les pays en développement.

Cette approche par la morphologie pour estimer le poids des animaux est aujourd'hui revisitée grâce au développement de nouvelles techniques d'imagerie en 2D [9.11, 9.12] et récemment en 3D (en relief) [9.13], et au développement des traitements d'image. Certains systèmes proposent déjà une estimation du poids des porcs ou des vaches laitières à partir d'une image en 3D du dos de l'animal [9.14] (Optiscan®, Opticow®, commercialisés par Hölscher et Leuchner, Emsbüren, Germany). Encore peu précises, ces méthodes pourraient connaître un développement important à l'avenir, car leur coût peut être faible et l'automatisation assez simple.

Mesure de l'état corporel : une mesure complexe enfin facilement disponible en élevage ?

La notion d'état corporel est intuitive : on parle couramment d'animaux gras et d'animaux maigres. L'état corporel est couramment associé à la masse lipidique corporelle, appelée adiposité. La mesure de cette adiposité se fait par des méthodes très sophistiquées non applicables hors cadre expérimental. Jusqu'à récemment, la notation d'état corporel réalisée visuellement ou par palpation prévaut. De nouvelles approches moins subjectives devraient marquer un tournant dans l'évaluation de ce caractère.

Une mesure de référence de l'adiposité difficile à définir

Contrairement au poids, la première difficulté de la mesure de l'adiposité reste la définition de la mesure de référence. Cette étape est indispensable pour développer de nouvelles méthodes plus simples et moins coûteuses. Si l'on accepte généralement que cette mesure doit faire référence à la teneur en lipides de la carcasse, la détermination de cette mesure est un vrai défi pour des animaux comme les gros bovins : après abattage, il faut broyer entièrement les carcasses pour faire des analyses de la teneur en lipides. Il n'est donc ni possible de faire cette mesure sur des animaux vivants, ni possible de réaliser des mesures répétées. Une référence alternative consistait à utiliser des marqueurs qui diffusent facilement dans l'eau corporelle, mais pas dans les lipides. La concentration du marqueur dans l'eau corporelle permet de calculer l'espace de diffusion du marqueur. Cet espace est converti en masse, appelée masse délipidée. La masse lipidée s'obtient par différence entre la masse corporelle et délipidée. Le deutérium est le marqueur qui offre la meilleure précision, mais le processus est très lourd, onéreux, moyennement précis et peu sensible pour estimer de faibles variations des réserves lipidiques [9.15].

La révolution technologique en imagerie humaine avec le développement des scanners à rayons X (RX) au début des années 1980 a été utilisée rapidement en élevage dans plusieurs pays, malgré le coût élevé de l'appareil. Depuis une dizaine d'années, des scanners RX ont été installés dans des camions mobiles permettant des mesures plus fréquentes sur des animaux de plus grande taille [9.16] (photo 9.1). La taille de ces scanners, déjà imposante, limite leur utilisation à de petits animaux tels que les caprins, ovins et porcs. La mesure est relativement rapide et non invasive, mais nécessite une anesthésie générale des animaux.

Les propriétés des rayons X changent en fonction de la densité des tissus traversés : c'est cette variation de propriétés qui permet de reconstituer en image 3D la partie interne du corps qui a été scannée. Ces images ont une résolution très importante qui permet d'extraire avec précision des mesures telles que la taille des organes et la teneur en gras des tissus. Les applications sont multiples, telles que la classification des carcasses, la mesure de la taille ou la forme de certains organes, l'estimation de la composition de la carcasse... Elles ont démontré des prédictions très précises chez les porcs pour étudier la composition corporelle [9.16] et permettent de discriminer l'effet de traitements alimentaires sur les teneurs en gras et en muscles [9.17]. Elles sont sans doute appelées à servir de référence pour le développement de techniques simplifiées pour estimer la composition corporelle des espèces de petite taille, mais ne sont pas disponibles pour les bovins.

Grilles de notation de l'état corporel

L'estimation de l'état des réserves corporelles en élevage se fait indirectement par notation de l'état corporel. Des grilles de notation ont été développées et sont spécifiques de chaque espèce, voire différent selon la race pour certaines espèces (tableau 9.1). Au sein d'une

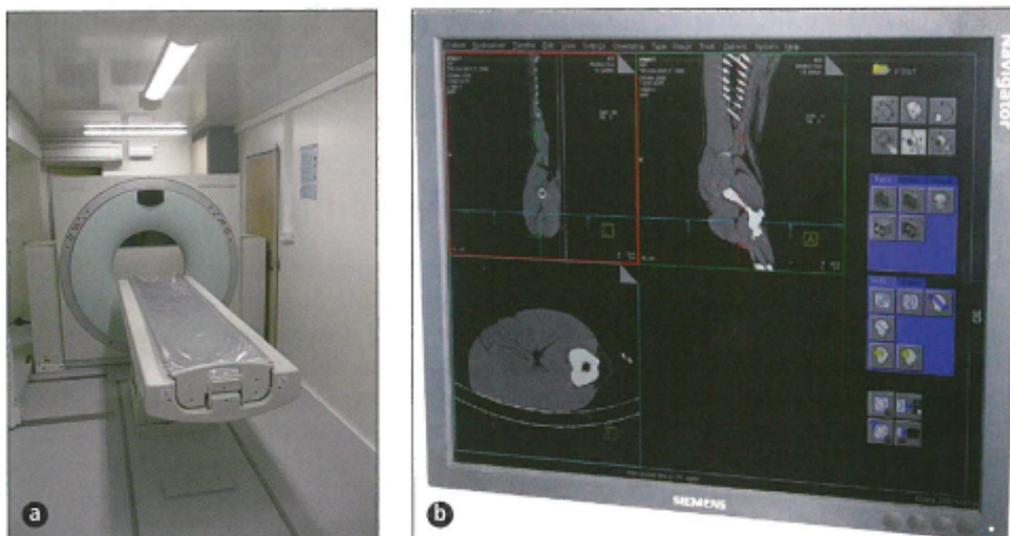


Photo 9.1 Scanner à rayons X (a), adapté pour scanner des animaux de taille petite à moyenne, comme les porcs et les petits ruminants : exemple de scan sur un porc (b)

D'après Daumas et Monziols, 2008 [9.18].

Tableau 9.1 Caractéristiques par espèce des grilles de notation d'état corporel utilisées en France

Espèce	Spécificité de la grille	Echelle souvent utilisée en France	Grille de référence	Exemples de grilles
Bovins laitiers	Par race	0 à 5	Bazin, 1984 [9.19]	Chastant, 2008 [9.24]
Bovins allaitants	–	0 à 5	Agabriel <i>et al.</i> , 1986 [9.20]	UNCEIA, 2010 [9.25]
Caprins	–	0 à 5	Hervieu <i>et al.</i> , 1989 [9.21]	PEP Caprins, 2012 [9.26]
Ovins	–	0 à 5	Russel <i>et al.</i> , 1969 [9.22]	Sagot et Pottier, 2010 [9.27]
Porcins	–	0 à 5 ou 1 à 6 1 à 5	Patience <i>et al.</i> , 1995 [9.23]	Delteil et Meymerit, 2012 [9.28]

même espèce, les grilles peuvent changer en fonction du pays et même si les critères de notation et les zones anatomiques sont souvent similaires, la comparaison interpays n'est pas simple. Le principe de la notation consiste à noter chaque animal visuellement ou par palpation au niveau des zones anatomiques de référence de la grille, souvent le flanc et l'arrière de l'animal : la note la plus faible de la grille est associée à un animal très maigre et la note la plus élevée à un animal très gras. Si ces méthodes sont simples en apparence, elles restent subjectives. Pour limiter ce défaut, les personnes habilitées à noter se recalent souvent entre elles pour standardiser les mesures le plus possible. Malgré tout la répétabilité des mesures reste faible (écart type d'environ 0,3 point pour la notation française allant de 0 à 5 pour les bovins) et la méthode assez chronophage, ce qui limite les mesures à de faibles fréquences, même en station expérimentale. De nombreux travaux de recherche mettent en évidence l'importance du suivi des variations d'état corporel en élevage [9.3]. La faible répétabilité de la notation d'état corporel et le faible nombre de mesures réalisables ne permettent pas de détecter de petites variations d'état corporel à l'échelle individuelle et ne fournissent donc qu'une évaluation moyenne de l'état corporel.

Utilisation de nouvelles technologies pour mesurer l'état corporel plus objectivement

Pour remédier à la subjectivité de l'estimation de l'état des réserves corporelles par notation, de nouvelles technologies ont été adaptées aux animaux. Les approches passant par des paramètres métaboliques caractéristiques de l'état corporel, ou l'impédancemétrie qui estime la composition corporelle à partir des différences de conductivité des tissus, sont trop contraignantes ou pas assez précises pour des mesures de monitoring. L'utilisation des ultrasons et les techniques d'imagerie ressortent aujourd'hui comme des approches pertinentes pour objectiver la mesure de l'état corporel.

Utilisation des ultrasons pour mesurer l'adiposité de l'animal

La vitesse et la direction de propagation des ultrasons, ondes ayant des fréquences supérieures à celles audibles, sont modifiées par la nature des matériaux qu'ils traversent. Leur vitesse de propagation dans le tissu adipeux est environ 10 % plus faible que dans les muscles. La vitesse de propagation des ultrasons à travers le corps permet d'estimer la teneur en lipides corporels. La mesure de la vitesse de propagation des ultrasons avec le VOS (*Velocity Of Sound*) a fait l'objet de nombreux travaux dans le passé [9.29], en particulier sur les bovins. Pour que les mesures soient pertinentes et répétables, la trajectoire des ultrasons à travers le corps est judicieusement choisie, notamment pour éviter les zones osseuses ou vides. C'est une méthode trop onéreuse et chronophage pour une utilisation à grande échelle sur animaux vivants.

L'autre application des ultrasons relève de l'échographie. Les ultrasons envoyés par salves par la sonde de l'échographe traversent les tissus sous-jacents à la sonde jusqu'à une certaine profondeur et sont réfléchis par les tissus vers la sonde. L'échographie est une technique communément utilisée en médecine humaine et vétérinaire qui aboutit à une image en 2D de la représentation tissulaire en profondeur de la partie corporelle échographiée. Elle a principalement été utilisée pour estimer l'état corporel à partir de l'épaisseur de gras sous-cutané des animaux. Cette épaisseur peut être mesurée avec un échographe à sonde « unidirectionnelle » ou « bidirectionnelle », aussi utilisé pour les diagnostics de gestation. Le premier affiche directement l'épaisseur totale de lard de l'animal : la mesure est rapide et peu chère mais l'information fournie est limitée à cette épaisseur. Pour le second, l'épaisseur de gras sous-cutané est directement mesurée sur l'écran affichant l'image des tissus en temps réel (figure 9.4) : la mesure est plus longue mais l'information fournie est plus riche. Très utilisées chez les porcs, ces mesures montrent une bonne corrélation avec la note d'état corporel [9.30] (figure 9.5). Cette relation semble cependant non linéaire, indiquant que chez les animaux plutôt maigres la mobilisation des réserves affecte plus le gras intra-abdominal que le gras de surface. Cette observation est aussi valable chez les bovins, pour lesquels l'utilisation de l'échographie est moins courante. En pratique, ces méthodes restent coûteuses en temps et en matériel, et encore peu utilisées en élevage, à l'exception des appareils de type unidirectionnel chez les porcs.

Analyse des formes de l'animal par traitement automatique d'images

La notation d'état corporel (NEC) est ici abordée sous un angle plutôt visuel fondé sur la « rondeur » physique de l'animal. Une simple observation permet de constater que l'état corporel d'un animal se reflète en surface à travers sa « rondeur » physique : un animal maigre a une forme plus anguleuse qu'un animal gras, qui a une forme plus ronde. Partant de ce principe, l'objectif n'est plus d'analyser une image interne de l'animal comme pour l'échographie, mais bien d'analyser l'image externe de l'animal à travers sa forme physique. Les premières approches ont vu le jour en 2006 et se fondaient sur la notation de l'état corporel non plus des animaux vivants mais de leurs photos. Suite à l'essor des jeux vidéo, les techniques d'imagerie sont devenues plus accessibles d'un point de vue financier et technique. L'analyse de forme pour estimer l'état corporel a évolué de l'analyse d'une simple photo en 2 dimensions (2D) vers une image en 3D de l'animal. Les images 3D sont d'une grande qualité et contiennent beaucoup plus d'informations que les images 2D.



Figure 9.4 Échographie réalisée au niveau de la 4^{ème} vertèbre lombaire avec un échographe bidirectionnel et identification de 3 épaisseurs sous-cutanées : épaisseur de la peau (L4P), épaisseur de la peau et du tissu adipeux (L4PA) et épaisseur de la peau, du tissu adipeux et du muscle (L4PAM)

Source : C. Staub et J.-L. Touzé, INRA Tours.

L'acquisition de l'image 3D est la première étape, qui ne dure que quelques secondes ou peut même être instantanée. Généralement, quelle que soit l'approche considérée, les images se focalisent sur la partie arrière de l'animal, avec une vue du dessus ou une coupe transversale de la partie arrière. La partie la plus délicate en termes de travail et de technique réside dans le traitement de l'image brute. L'objectif du traitement est d'extraire l'information 3D associée à la « rondeur physique » de l'animal qui va servir à estimer l'état corporel. Le choix de cette information et du traitement est essentiel car il va conditionner la qualité des données et l'automatisation de la méthode. Les premières approches, datant du milieu des années 2000, ont cherché à caractériser la forme de l'animal à partir de certaines mensurations telles que des angles, des surfaces ou des distances [9.11, 9.31, 9.32]. L'utilisation de ces mensurations spécifiques rend les méthodes parfois difficiles à automatiser et leur transposition à différentes races ou espèces moins rapide. Plus récemment, certains travaux ont favorisé l'utilisation de méthodes d'apprentissage de formes [9.33, 9.34] (photo 9.2). Ces méthodes sont plus génériques car elles construisent, sans *a priori*, les critères qui décrivent le mieux les variations de la forme des images 3D en traitant l'ensemble de la forme 3D, par exemple par analyse en composantes principales. Toutes

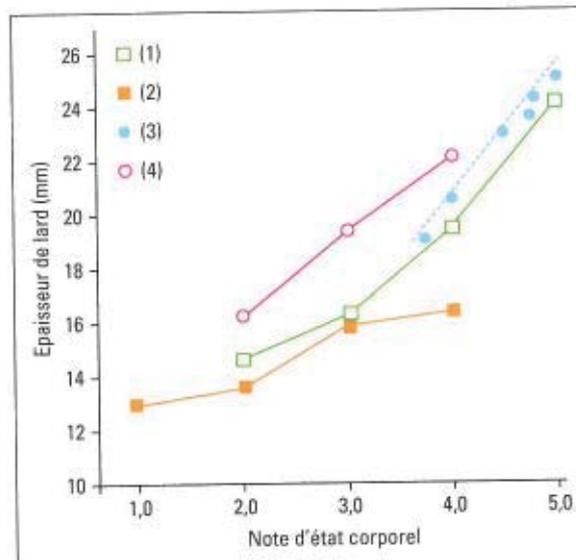


Figure 9.5 Relations entre les notations d'état corporel et les mesures d'épaisseur de gras dorsal chez la truie issues de différents travaux

D'après Dourmad *et al.*, 2001 [9.30]; Dupas et Briend, 1997 (1, 2); Buron et Gatel, 1992 (3); Courboulay et Caugant, 1990 (4).

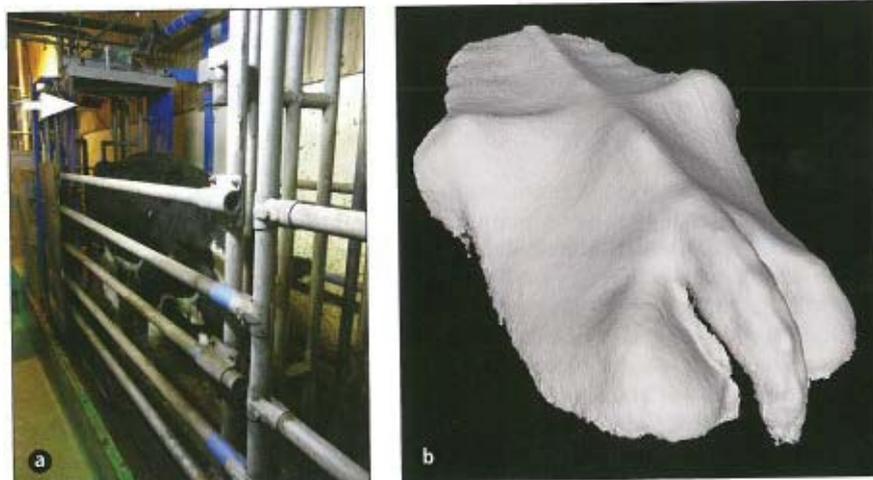


Photo 9.2 Estimation de la note d'état corporel (NEC) à partir d'images 3D (b) obtenues à l'aide d'un capteur de profondeur infrarouge situé au-dessus de la stalle de pesée (a, flèche)

D'après la méthode de Fischer *et al.*, 2014 [9.34].

ces méthodes sont très sensibles au choix des images utilisées pour calibrer la méthode. Ces images de calibration doivent représenter le maximum de la variation observable pour le critère à observer, ici la note d'état corporel, et un maximum de variation pour les autres caractéristiques des animaux (poids vif, stade de lactation, parité) afin de construire une population caractéristique de la population existante en ferme (figure 9.6).

Pour prouver le concept de la méthode, la calibration doit être complétée par 2 étapes essentielles: d'une part estimer l'erreur de la méthode pour des images n'ayant pas servi à la calibration, c'est la validation externe; d'autre part, calculer l'erreur de reproductibilité qui correspond à l'erreur de la méthode pour des mesures de NEC répétées sur les mêmes individus. Par exemple, l'automatisation de la méthode développée par Fischer *et al.* [9.34] réalise une NEC par imagerie 3D précise à 0,31 point en validation externe pour une échelle allant de 0 à 5 et une erreur de 0,2 point de NEC en reproductibilité: quelle que soit la mesure de référence utilisée, ici la NEC, cette méthode 3D réalisera *a minima* une erreur de 0,2 point de NEC. L'automatisation permet cependant de répéter la mesure pour réduire l'erreur de mesure.

Ces approches fournissent des résultats prometteurs pour le monitoring de l'état corporel en élevage: il devient possible d'estimer la note d'état corporel par imagerie 3D de façon très reproductible et avec des erreurs de prédiction similaires à celles de la NEC. La performance de ces méthodes encourage les fabricants d'outils de monitoring en élevage à développer et commercialiser ces produits en élevage (photo 9.3). La fréquence des mesures permise par l'automatisation du monitoring de l'état corporel va réduire l'incertitude de la mesure et permettre de détecter des variations d'état corporel avec une amplitude plus faible qu'auparavant.

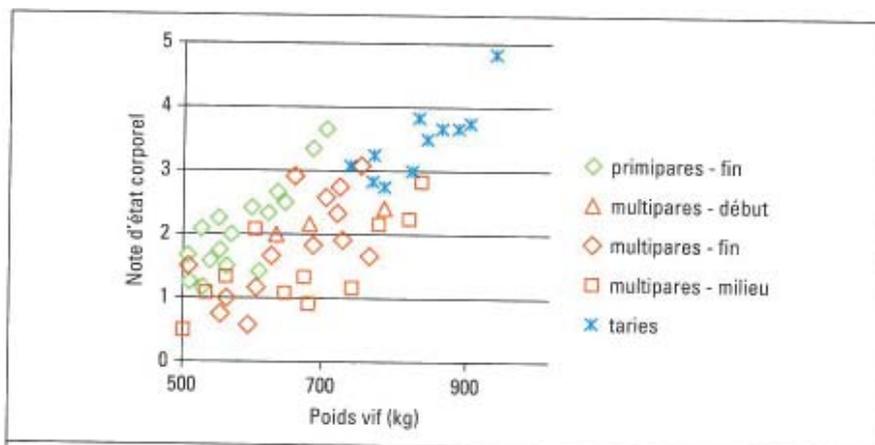


Figure 9.6 Caractéristiques de la population de calibration utilisée pour développer la notation d'état corporel par imagerie 3D dans Fischer *et al.*, 2014 [9.34]

Répartition en fonction de la note d'état corporel, du poids vif, de la parité et du stade de lactation: début = 0-60 jours; milieu = 60-150 jours; fin = 150-305 jours.



Photo 9.3 Système de monitoring de la NEC développé par DeLaval: la caméra (b) est installée dans un couloir (a), à l'abri de la lumière

Exemple de l'installation à la ferme expérimentale de Trévarez (29).

© A. Fisher.

Quelles plus-values du monitoring du poids et de l'état corporel dans les élevages de demain ?

Comment ces nouvelles possibilités de mesurer en continu le poids vif et l'état corporel vont-elles s'intégrer demain dans les élevages ? Quelles plus-values faut-il en attendre ? Ces questions sont légitimes et, au-delà de la prouesse technologique de ces nouveaux outils, il convient de voir en quoi ces informations peuvent contribuer à améliorer les performances des élevages.

Le bilan énergétique mesuré dans les élevages demain ?

Le bilan énergétique de l'animal estimé par le bilan alimentaire est généralement une donnée qui n'est connue que dans des conditions expérimentales très coûteuses. Pourtant, il peut indiquer une dégradation de la qualité de la ration, des troubles sanitaires chroniques ou encore une complémentation insuffisante de certains individus. Récemment des travaux mettent en avant la possibilité d'estimer les variations de bilan énergétique à partir des données de poids vif très fréquentes. Par exemple, un système d'alertes développé par De Mol et al. [9.35] sur vaches laitières visait à détecter de trop fortes baisses en début de

lactation, ou augmentations en fin de lactation, de l'état corporel, assimilées à des variations de bilan énergétique, à partir des variations de poids: cette méthode est très sensible, mais manque de spécificité. Le modèle un peu plus mécaniste de Friggens *et al.* [9.8] combine les informations très fréquentes de poids vif et de note d'état corporel. Ce modèle permet d'estimer directement un bilan énergétique des vaches laitières sans passer par le calcul d'un bilan alimentaire et des dépenses énergétiques (figure 9.7). S'il reste encore des progrès à faire dans ces modèles, en particulier en estimant mieux le poids des contenus digestifs, ces approches sont prometteuses et devraient permettre de disposer à terme en élevage d'une information totalement nouvelle pour la conduite des animaux.

Vers une prévision des quantités ingérées ?

Le poids des vaches laitières varie au cours de la lactation en fonction des contenus digestifs et de l'état des réserves corporelles, comme cela a été mentionné au début de ce chapitre. Les contenus digestifs sont fonction des quantités ingérées et les variations des réserves corporelles sont fonction du bilan énergétique. Les contenus digestifs sont une composante du poids vif très variable en fonction du type de régime et de l'animal. Ils ont donc longtemps été considérés comme une information parasite dans l'interprétation du poids vif. En fait ils peuvent renseigner assez rapidement sur les variations d'ingestion sous réserve de pesées très fréquentes des animaux et si possible dans des conditions répétables. Pour les bovins, 1 kg de matière sèche ingérée équivaut en général à 3-4,5 kg de contenu digestif. Des variations rapides d'ingestion vont donc se traduire par des variations importantes du poids vif dans les 2 à 3 jours suivants. Le bilan énergétique correspond à la différence entre les apports et les dépenses énergétiques. Ces apports, comme les contenus digestifs, sont fonction des quantités ingérées. Il est donc possible de modéliser assez simplement les quantités ingérées en intégrant les données de poids et de production laitière

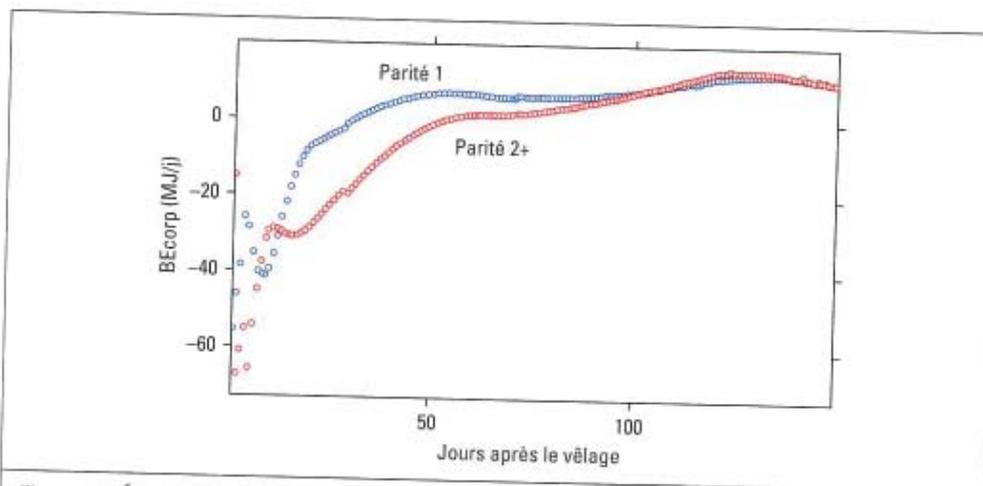


Figure 9.7 Évolution du bilan énergétique (BE_{corp}) en MJ/j estimé pour des primipares (Parité 1) et des multipares (Parité 2+) à partir des variations de poids vif et de la note d'état corporel, suivant le modèle de Friggens *et al.* (2011) [9.8]

pour représenter les dépenses énergétiques, ainsi que la composition de la ration. Un premier modèle construit à partir des données journalières de poids vif et de production laitière donne des résultats prometteurs pour estimer les quantités ingérées [Faverdin *et al.*, non publié] (figure 9.8). Les perspectives d'estimation en temps réel des quantités ingérées attestent des nouvelles possibilités offertes par les données de poids et de productions.

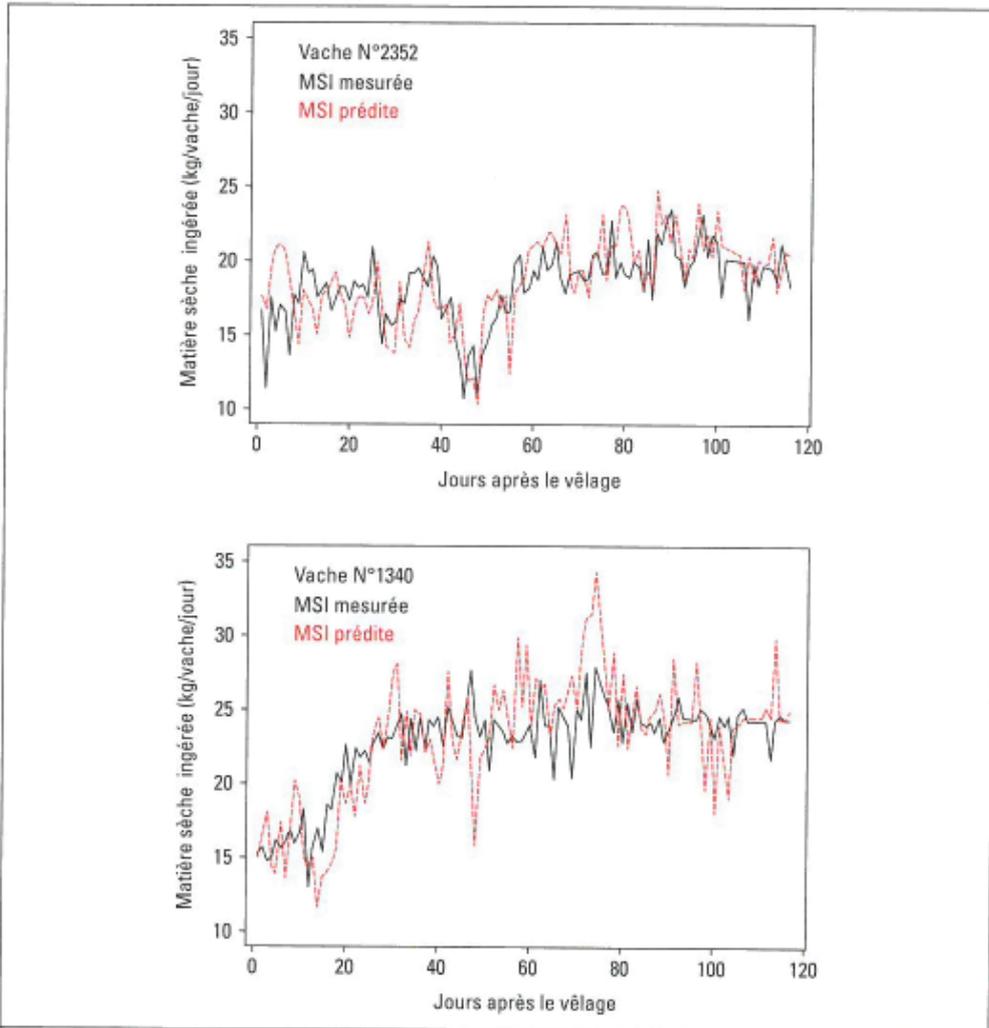


Figure 9.8 Comparaison des données de quantités ingérées (MSI: matière sèche ingérée) par deux vaches laitières au cours des 4 premiers mois de lactation, observées (traits pleins noirs) ou simulées (tirets rouges) à partir d'un modèle utilisant les données journalières de poids vif et de production laitière, connaissant la composition de la ration

D'après Faverdin *et al.* (non publié).

Intégration de ce nouveau monitoring dans l'élevage de précision

Ces informations individuelles du statut nutritionnel des animaux à des PAS de temps assez courts vont offrir des perspectives très intéressantes pour un élevage de précision. Elles vont permettre d'améliorer la détection des troubles de santé, y compris des maladies chroniques qui sont associées à des chutes modérées mais souvent prolongées d'appétit. Ces données, combinées à celles d'autres automates, vont enrichir les systèmes d'information. Les conduites pourront être plus individualisées, par exemple en adoptant une alimentation de précision qui vise à corriger l'alimentation en fonction des informations issues de ces nouvelles mesures. La variabilité individuelle, difficile à maîtriser en élevage, pourra devenir un atout pour gagner en efficacité alimentaire en ajustant précisément l'alimentation, la production à la demande et en réduisant l'utilisation des ressources. Les robots de traite en élevage bovin laitier proposent dès maintenant toutes ces nouvelles technologies pour aider à la conduite d'élevage. Les développements pour les autres espèces arriveront sans doute plus tard, lorsque les coûts et les technologies seront mieux maîtrisés.

Conclusion

Les nouvelles technologies apportent un regard neuf sur de vieux phénotypes essentiels en élevage.

L'arrivée des nouvelles technologies dans le domaine de l'élevage va sans doute amener à un regard différent sur l'utilisation du poids et de l'état corporel en élevage. Ces données, généralement mesurées avec une faible précision et à très faible fréquence, vont être accessibles à « haut débit » grâce à l'automatisation de leur mesure. De fait, elles donneront accès à de nouvelles informations liées à la composition corporelle, au bilan énergétique et aux quantités ingérées, qui dépassent l'interprétation classique des mesures du poids vif et de l'état corporel. C'est donc bien une nouvelle dimension de ces mesures qui va progressivement se développer dans les élevages de demain pour améliorer la qualité du travail et leur compétitivité.

Références

- [9.1] Larousse. *Instructions aux paysans pour l'élevage de leurs troupeaux*. Paris: Éditions Larousse, 2007: 192 p.
- [9.2] FranceAgriMer. *Pesée/Classement/Marquage – Guide technique et réglementaire – Gros bovins, veaux, ovins, porcs*. Les guides FranceAgriMer. Montreuil: FranceAgriMer, 2010.
- [9.3] Roche J, Friggens N, Kay J, Fisher M, Stafford K, Berry D. Invited review: Body condition score and its association with dairy cow productivity, health, and welfare. *J Dairy Sci* 2009; 92: 5769-801.
- [9.4] Berry DP, Buckley F, Dillon P, Evans RD, Rath M, Veerkamp RF. Genetic relationships among body condition score, body weight, milk yield, and fertility in dairy cows. *J Dairy Sci* 2003; 86 (6): 2193-204.

- [9.5] Pryce JE, Harris BL. Genetics of body condition score in New Zealand dairy cows. *J Dairy Sci* 2006; 89 (11): 4424-32.
- [9.6] Chilliard Y, Rémond B, Sauvant D, Vermorel M. Particularités du métabolisme énergétique. *Bulletin Technique CRZV Theix INRA* 1983; 53: 37-64.
- [9.7] Cveticanin D, Wendl G. Dynamic weighing of dairy cows: using a lumped-parameter model of cow walk. *Comput Electron Agric* 2004; 44: 63-9.
- [9.8] Friggens NC, Thorup VM, Edwards D. Estimation à la ferme du bilan énergétique des vaches laitières à l'aide des mesures fréquentes de poids vif et de note d'état corporel. *Renc Rech Ruminants* 2011; 18: 39-42.
- [9.9] Marquis B. Système de pesage automatique des porcs d'engraissement, le point sur cette technologie d'avant-garde. In: *Expo-Congrès du porc du Québec*, 13-14 avril 2005, Saint-Hyacinthe, Canada. Saint-Hyacinthe, Canada: Association du congrès du porc: fédération des producteurs de porcs du Québec, 2005: 5-17. <http://www.promotionsroger.com/porc/pdf/CONFERENCE2005.pdf> (consulté le 28 juillet 2015).
- [9.10] Lecomte P, Lhoste P, Meyer C, Vall E. L'élevage bovin. In: CIRAD-GRET – Ministère des Affaires étrangères, ed. *Mémento de l'agronome*. Versailles: Éditions Quae, 2002: 1427-55.
- [9.11] Negretti P, Bianconi G, Bartocci S, Terramocchia S, Verna M. Determination of live weight and body condition score in lactating Mediterranean buffalo by Visual Image Analysis. *Livest Sci* 2008; 113: 1-7.
- [9.12] Yang Y, Teng G. Estimating pig weight from 2D images. In: *First IFIP TC 12 international conference on computer and computing technologies in agriculture (CCTA 2007)*, 18-20 août 2007, Wuyishan. Boston, USA: Springer, IFIP (the International Federation for Information Processing), 2008: 1471-4.
- [9.13] Tasdemir S, Urkmez A, Inal S. Determination of body measurements on the Holstein cows using digital image analysis and estimation of live weight with regression analysis. *Comput Electron Agric* 2011; 76: 189-97.
- [9.14] Bergfeld U, Pache S, Hölscher R, Steinhöfel I, Fischer R. Automatic measurement of the body condition of dairy cows with three-dimensional picture processing. In: *64th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science*, 26-30 août 2013, Nantes. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2013: p. 152.
- [9.15] Tissier M, Thériez M, Purroy A, Bocquier F. Estimation *in vivo* de la composition corporelle de la brebis par mesure de l'espace de diffusion de l'eau lourde. *Reprod Nutr Dev* 1983; 23 (4): 693-707.
- [9.16] Daumas G. Taux de muscle des pièces et appréciation de la composition corporelle des carcasses. In: *Journées de la recherche porcine*, 5-6 février 2008, Paris. Paris: IFIP-INRA, 2008: 61-8.
- [9.17] Monziols M, Hemonic A, Vautier B, Brossard L, Van Milgen J, Quiniou N. Utilisation de la tomographie RX pour étudier l'évolution de la composition corporelle au cours de la croissance chez des porcs alimentés à volonté ou rationnés. In: *46^e Journées de la recherche porcine*, 4-5 février 2014, Paris, France. Paris: IFIP-INRA, 2014: 45-50.

- [9.18] Daumas G, Monziols M. Un scanner à rayons X au service de la filière. *TechniPorc* 2008; 31 (4): 9-14.
- [9.19] Bazin S. *Grille de notation de l'état d'engraissement des vaches pies-noires*. Paris: ITEB RNED, 1984: 31 p.
- [9.20] Agabriel J, Giraud JM, Petit M. Détermination et utilisation de la note d'état d'engraissement en élevage allaitant. *Bulletin Technique CRZV Theix INRA* 1986; 66: 43-50.
- [9.21] Hervieu J, Colomer-Rocher P, Branca A, Delfa R, Morand-Fehr P. *Définition de la note d'état corporel des caprins*. Réseaux AGRIMED-FAO de recherches coopératives sur les productions ovines et caprines, 1989: 5 p.
- [9.22] Russel AJF, Gunn RG, Doney JM. Subjective assesment of body fat in live sheep. *J Agric Sci* 1969; 72 (3): 451-4.
- [9.23] Patience JF, Thacker PA, De Lange CFM. Nutrition of the breeding herd. In: Patience JF, Thacker PA, De Lange CFM, eds. *Swine Nutrition Guide*. 2nd edition. Saskatoon: Prairie Swine Centre Inc., 1995: 146. <http://www.prairieswine.com/swine-nutrition-guide-2/> (consulté le 28 juillet 2015).
- [9.24] Chastant S. L'évaluation de l'état corporel. In: Institut de l'élevage, ed. *Maladies des bovins*. Paris: Éditions France Agricole, 2008: 466-7.
- [9.25] UNCEIA – Groupe Fertilité Femelle. *État corporel des vaches allaitantes*. Fiche n° III.9. REPRO Guide. Paris: UNCEIA, 2010.
- [9.26] PEP Caprins. *Estimer l'état corporel des chèvres. Quelle utilité? Quelle méthode?* Lyon: Pôle d'expérimentation et de progrès caprins, 2012: 3 p. <http://www.pep.chambagri.fr/caprins-acces-ressources/elevage/alimentation-2?layout=blog> (consulté le 28 juillet 2015).
- [9.27] Sagot S, Pottier E. *Note d'état corporel des brebis: grille de notation et recommandations*. Paris: Institut de l'élevage, 2010: 2 p. <http://idele.fr/domaines-techniques/sequiper-et-sorganiser/elevage-de-precision/publication/idelesolr/recommends/note-detat-corporel-des-brebis-grille-de-notation-et-recommandations.html> (consulté le 28 juillet 2015).
- [9.28] Delteil L, Meymerit C. La démarche générale: l'animal dans son contexte. In: Ardouin E, ed. *Manipulations, interventions et appréciations en élevage porcin*. Dijon: Éditions Educagri, coll. « Zootechnie », 2012: 105-6.
- [9.29] Fisher AV. A review of the technique of estimating the composition of livestock using the velocity of ultrasound. *Comput Electron Agric* 1997; 17: 217-31.
- [9.30] Dourmad JY, Étienne M, Noblet J. Mesurer l'épaisseur de lard dorsal des truies pour définir leurs programmes alimentaires. *INRA Prod Anim* 2001; 14 (1): 41-50.
- [9.31] Bewley J, Peacock A, Lewis O, Boyce R, Roberts D, Coffey M et al. Potential for estimation of body condition scores in dairy cattle from digital images. *J Dairy Sci* 2008; 91: 3439-53.

- [9.32] Bewley J, Boehlje M, Gray A, Hogeveen H, Kenyon S, Eicher S *et al.* Assessing the potential value for an automated dairy cattle body condition scoring system through stochastic simulation. *Agric Finance Rev* 2010; 70: 126-50.
- [9.33] Azzaro G, Caccamo M, Ferguson J, Battiato S, Farinella G, Guarnera G *et al.* Objective estimation of body condition score by modeling cow body shape from digital images. *J Dairy Sci* 2011; 94: 2126-37.
- [9.34] Fischer A, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM, Faverdin P. Améliorer la mesure de l'état des réserves corporelles des vaches laitières en analysant la surface 3D du dos de la vache. *Renc Rech Ruminants* 2014; 21: 23-6.
- [9.35] De Mol RM, Ipema AH, Bleumer EJB, Hogewerf PH. Application of trends in body weight measurements to predict changes in body condition score. *In: Precision Livestock Farming' 13, 6th European Conference on Precision Livestock Farming*, 10-12 Septembre 2013, Leuven, Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, KU Leuven. Leuven: Daniel Berckmans and Joris Vandermeulen: 551-60.

Présentations orales

- Fischer A**, Luginbuhl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2014a. Analyzing the back of dairy cows in 3D imaging to better assess body condition. In 65th Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), 25-29/08/2014, Copenhagen, Denmark, p. 127.
- Fischer A**, Luginbuhl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2015d. Analyzing the rear shape of dairy cows in 3D to better assess body condition score. In ADSA-ASAS JAM, 12-16/07/2015, Orlando, USA, p. 814.
- Fischer A**, Luginbuhl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2014b. L'imagerie 3D pour évaluer l'état corporel des vaches laitières. In XIIIème journées de l'animation transversale "Glande mammaire, Lait", 20-21/11/2014, Rennes, France.
- Fischer A** and Faverdin P 2016. Rumen temperature monitoring to assess feed efficiency of dairy cows. In 67th Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), 29/08/2016-02/09/2016, Belfast, UK, p. 405.
- Fischer A**, Delagarde R and Faverdin P 2016a. Ability to digest explains part of the between cow feed efficiency variability. In 67th Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), 29/08/2016-02/09/2016, Belfast, UK, p. 549.

Analysing the back of dairy cows in 3D imaging to better assess body condition*A. Fischer^{1,2,3}, T. Luginbühl⁴, L. Delattre⁴, J.M. Delouard⁴ and P. Faverdin^{2,3}**¹Institut de l'Élevage, Le Rheu, 35650, France, ²Agrocampus Ouest, UMRI1348 PEGASE, Rennes, 35000, France, ³INRA, UMRI1348 PEGASE, St-Gilles, 35590, France, ⁴3D Ouest, 22300, Lannion, France; amelie.fischer@rennes.inra.fr*

Body condition is an important trait in dairy cow management, usually measured with the body condition score (BCS), which is subjective, and not very sensitive. The aim of this work was to develop and to validate a method, NEC3D, estimating BCS with 3D pictures of dairy cows back, from the pins to the hooks, which is commonly used as reference area in the BCS scoring systems. A 57 cows 3D-shapes dataset with large BCS variability (0.5 to 4.75 on a 0-5 scale), transformed with a principal component analysis, was built for calibration. The principal components were performed on BCS with multiple linear regressions. Four anatomical points had to be identified manually to normalise the pictures. Influence of two different ways of points' identification and of the picture resolution on method quality was analysed. External validation was evaluated on two additional datasets: one with cows used for calibration, but with a different stage in milking (valididem) and one with cows not used for calibration (validdiff). To fully qualify the method, the reproducibility was estimated with 6 cows using 8 3D-shapes of each cow obtained the same day. Both ways of points' identification had quite good results in terms of calibration ($R^2=1$) and differed slightly on validation quality (RMSE=0.34 vs 0.32 for validdiff). Nec3d was 2.8 times more reproducible than usual BCS ($\sigma=0.1$ vs 0.28). The lowest resolution implied a loss of reproducibility, but did not increase the error of prediction. A simplified acquisition system, implying low resolution, could therefore be developed. The error of prediction was similar for valididem and validdiff, indicating that the NEC3D is not less efficient for cows not used in the calibration set. Assessing body condition thanks to 3D shapes appears to be a promising tool which can improve phenotyping of this trait.

683 Analyzing the rear shape of dairy cows in 3D to better assess body condition score. Amélie Fischer*^{1,2}, Thibault Luginbühl³, Laurent Delattre³, Jean-Michel Delouard³, and Philippe Faverdin¹, *1INRA/Agrocampus-Ouest UMR 1348 Pegase, St-Gilles, France, 2Institut de l'élevage, Le Rheu, France, 3D'Ouest, Lannion, France.*

Body condition is an important trait in dairy cow management, mainly because it reflects the level and the use of body reserves and indirectly reproductive and health performance. Body condition score (BCS), which is done visually or by palpation, is the usual method on farm but is subjective and not very sensitive. The aim was here to develop and to validate 3DBCS which estimates BCS from 3D-shapes of dairy cows rear, the body area commonly used to assess BCS. For the calibration, a set of 57 3D-shapes from 56 Holstein cows with large BCS variability (0.5 to 4.75 on a 0-5 scale) were transformed with a principal component analysis (PCA). A multiple linear regression was fitted on the principal components to assess BCS. Four anatomical landmarks were extracted to normalize the 3D-shapes: the validation results of a manual labeling proved the concept. Then an automated labeling method was developed to extract them. Prior to the PCA, the 3D-shapes were either regularized to fill in the holes or not regularized. External validation was evaluated on 2 sets: one with cows used for calibration, but with a different lactation stage (valididem) and one with cows not used for calibration (validdiff). Repeatability was estimated with 6 cows scanned 8 times each the same day. The automated method performed slightly better than manual method for external validation (RMSE = 0.27 versus 0.34 for validdiff) and both were more repeatable than usual BCS ($\sigma = 0.20$ for 3DBCS and 0.28 for BCS). Surprisingly, regularizing the 3D-shapes performed slightly less than without regularization. Nevertheless regularization should be an interesting process before BCS assessing, especially to avoid discarding too many 3D-shapes. The first results of 3D-BCS monitoring in dairy cows with a fully automated method show promising results in terms of phenotyping. The next step will try to reduce scanning time to decrease the number of bad 3D-shapes due to cow's movement without losing too much resolution.

Key Words: body condition score, 3D imaging, principal component analysis

L'imagerie 3D pour évaluer l'état corporel des vaches laitières

A. Fischer

INRA, UMR1348 Physiologie, Environnement et Génétique pour l'Animal
et les Systèmes d'Élevage, Saint-Gilles, France

L'état des réserves corporelles est un phénotype d'intérêt en production laitière : il conditionne les performances de la vache et interagit avec les fonctions d'intérêt en production laitière : la reproduction et la santé. Ses variations reflètent le bilan énergétique de l'animal qui constitue un indicateur intéressant pour aider à piloter la conduite d'élevage. Ce phénotype reste cependant mesuré peu précisément en recherche et difficilement accessible dans les élevages. La méthode la plus courante en élevage est la notation d'état corporel : les experts attribuent une note d'état corporelle (NEC) selon une grille de notation variable en fonction du pays. Cette méthode est pratiquée en élevage car elle est peu chère, simple à utiliser mais nécessite du temps et reste subjective et peu sensible. L'essor récent des technologies d'imagerie permet aujourd'hui d'étudier leur utilisation en élevage pour rendre accessible certains phénotypes qui jusqu'alors étaient trop peu précis et faiblement répétables, tels que les boiteries ou l'état des réserves corporelles.

Ce travail vise à développer et à valider l'estimation des NEC à partir de l'information complète contenue dans des surfaces en 3 dimensions (3D) comprises entre les pointes de hanche et les pointes de fesses, les pointes de hanche et la base du sacrum étant identifiées manuellement sur les surfaces. Les experts ont attribué les NEC des vaches du troupeau de l'installation expérimentale INRA de Méjusseau et les surfaces 3D des vaches en lactation ont été collectées en sortie de traite par un capteur fixé dans la station de pesée. La calibration de l'information 3D sur la NEC a été réalisée sur 57 surfaces, sélectionnées pour avoir une population la plus hétérogène possible en NEC, poids vif, parité et stade de lactation. Une analyse en composantes principales a été appliquée à ce jeu de calibration pour extraire les composantes principales expliquant le maximum de variabilité du jeu de calibration. Ces composantes principales ont été incrémentées en tant que variables dans un modèle de régression linéaire multiple sélectionné par stepwise, pour estimer la NEC associée à chaque surface. La méthode a été validée sur 2 populations : une population de vaches déjà utilisées pour la calibration, mais réévaluées à un stade de lactation différent et une population de vaches externes au jeu de calibration pour mesurer l'impact sur l'erreur de prédiction. Pour qualifier la méthode, sa reproductibilité a été évaluée à partir d'un jeu de 6 vaches externes à la calibration, chacune prise 8 fois en 3D le même jour, et pour évaluer sa répétabilité, une acquisition par vache a été conservée et utilisée 8 fois dans la même journée pour estimer 8 fois la NEC de la vache. Le modèle montre de bons résultats de calibration sur la NEC et de bonnes validations avec des erreurs de prédiction de 0.31 point de note. L'erreur de prédiction étant très proche pour les 2 populations de validation, la méthode ne semble pas moins efficace avec des vaches externes à la calibration. La mesure de la NEC par les surfaces 3D apparaît 3 fois plus répétable (écart-type = 0,07 versus 0,21 pour la NEC) et 2.8 fois plus reproductible que la NEC estimée par les notateurs (écart-type = 0,1 versus 0,28 pour la NEC). L'automatisation complète du traitement d'image par la suppression de l'étape manuelle d'identification des points anatomiques de références est envisagée par la suite, car elle pourrait améliorer la répétabilité de la méthode. La valorisation de l'imagerie 3D pour estimer l'état des réserves corporelles de la vache laitière apparaît comme un outil très encourageant pour améliorer la qualité du phénotypage sur ce caractère et le rendre accessible à haut débit dans les élevages.

Rumen temperature monitoring to assess feed efficiency of dairy cows

A. Fischer^{1,2,3} and P. Faverdin^{1,2}

¹Agrocampus-Ouest, UMR 1348 PEGASE, 65 rue de Saint-Brieuc, 35000 Rennes, France, ²INRA, UMR 1348 PEGASE, domaine de la Prise, 35590 Saint-Gilles, France, ³Institut de l'élevage, Monvoisin, 35652 Le Rheu, France; amelie.fischer@rennes.inra.fr

Improving feed efficiency can be seen as a solution to increase farms economic and environmental sustainability as it contributes to decrease feed consumption and maintain or increase production. The main issue remains to measure feed efficiency on farm because total feed intake is only available in a few research facilities. However, new monitoring devices offer interesting perspective to find a predictor to assess feed efficiency. Assuming that water intake is highly associated to feed intake, we hypothesized that water efficiency, measured by rumen temperature, could be a predictor of feed efficiency in dairy cows. Feed efficiency and rumen temperature were monitored during the 238 first days of lactation for 60 Holstein cows fed ad libitum a unique TMR. Feed efficiency was defined as the residual energy intake (REI) calculated as the residuals of the linear regression of cumulated net energy intake (UFL, not corrected for digestive interaction due to intake level) on cumulated requirements for fat corrected milk yield, mean metabolic BW, mean BCS, empty BW gain and empty BW loss. Rumen temperature were monitored every 5 min with a rumen thermobolus (San'Phone[®], Medria). The daily sum of the difference between the rumen temperature corrected for water intake and raw rumen temperature was used as an indicator of water intake (WI). Water efficiency was defined as the residual water intake (RWI) calculated as the residuals of the linear regression of estimated WI on cumulated milk yield and mean BW. RWI explained 29% of REI variability with a coefficient of correlation of 55%. Feed efficiency assessed with REI can be measured indirectly with RWI which only requires on farm affordable phenotypes: rumen temperature, milk yield and BW. RWI appears as a promising way to include feed efficiency in a genomic selection strategy.

Ability to digest explains part of the between cow feed efficiency variability

A. Fischer^{1,2,3}, R. Delagarde^{1,2} and P. Faverdin^{1,2}

¹Agrocampus-Ouest, UMR 1348 PEGASE, 65 rue de Saint-Brieuc, 35000 Rennes, France, ²INRA, UMR 1348 PEGASE, domaine de la Prise, 35590 Saint-Gilles, France, ³Institut de l'élevage, Monvoisin, 35652 Le Rheu, France; amelie.fischer@rennes.inra.fr

Improving feed efficiency may be a solution to increase farms economic and environmental sustainability, through decreasing feed consumption and maintaining or increasing milk production. The main issue is to understand why inefficient cows need to consume more feed than the most efficient ones independently of their energy requirements level. Feed inefficiency could result from a lower dry matter (DM) diet digestibility: inefficient cows need to consume more feed than the efficient ones to cover their energy requirements. The aim of this study was to assess the relationship between feed efficiency and DM diet digestibility in dairy cows. Sixty Holstein cows were fed ad libitum a unique TMR during the 238 first days of lactation. Feed efficiency was defined as the residual energy intake (REI). The 60 individual REI were calculated as the residuals of the linear regression of cumulated net energy intake (UFL) not corrected for digestibility differences on cumulated requirements for fat corrected milk yield, metabolic BW, BCS, empty BW gain and empty BW loss. The cows were dosed with ytterbium oxide as an external marker during 2 periods of 14 days (2 × 5 days of rectal faecal sampling) to assess individual mean DM digestibility (known individual DM intake). Intake level (kg DMi/kg BW) explained 14% of REI variation and DM digestibility explained 9% of REI variation. Intake level explained 15% of DM digestibility variation. The more efficient the cow is, the lower the intake level is and the higher its digestibility is. Further investigation is planned to test the hypothesis that inefficient cows would be able to increase their feed efficiency through restricting their feeding level.

Posters

- Chanteloube A, Gicquel M, Le Chenadec H, Leroy M, **Fischer A**, Montagne L and Jurquet J 2015. Etat des lieux de l'utilisation de la notion d'efficience alimentaire par la filière bovin lait. In 22ème Journées Rencontres Recherches Ruminants, 02-03/12/2016, Paris, France, p. 257.
- Fischer A**, Lassalas J and Faverdin P 2016b. Identifier les vaches les plus efficaces grâce au monitoring de la température ruminale. In 23ème Journées Rencontres Recherches Ruminants, 07-08/12/2016, Paris, France, p. 51.
- Fischer A**, Luginbuhl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2014c. The rear's 3D shape summarized by principal component analysis predicts well body condition score in Holstein dairy cows. In 1st Dairycare conference, 22-23/08/2014, Copenhagen, Denmark, p. 41.
- Fischer A** and Faverdin P 2016. Prédire l'efficience alimentaire à partir du suivi de la température ruminale. In Journées des doctorants UMR PEGASE - UMR ADNC, 19/04/2016, St-Gilles, France.
- Fischer A**, Luginbuhl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2015e. Evaluer l'état corporel des vaches laitières par imagerie 3D. In Journées d'animation des crédits incitatifs du département PHASE, 05-06/04/2016, Tours, France.
- Fischer A**, Luginbuhl T, Delattre L, Delouard JM and Faverdin P 2015f. Evaluer l'état corporel des vaches laitières par imagerie 3D. In Les Terrenales 2015, 28-29/05/2015, St-Martin du Fouilloux, France.

ETAT DES LIEUX DE L'UTILISATION DE LA NOTION D'EFFICIENCE ALIMENTAIRE PAR LA FILIÈRE BOVIN LAIT

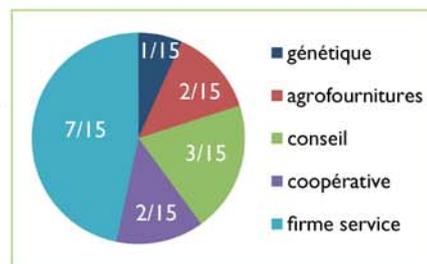


L'alimentation représente en moyenne 25 % du coût de production du lait. L'amélioration de l'efficience alimentaire (EA) des vaches pour optimiser la valorisation de la ration en produits est un levier pour gagner en compétitivité et durabilité. Aujourd'hui il n'existe **aucune définition de référence**.

Comment les acteurs de la filière bovins lait se situent-ils par rapport à l'EA ?

MÉTHODE

- **15 entreprises** intéressées par le sujet, représentant les **principaux acteurs de la filière** (21 sollicitations).
- Enquêtes qualitatives **semi-directives** auprès d'entreprises de la filière bovins lait de l'Ouest de la France : 47 min en moyenne/enquête.
- **3 thèmes** : les motivations, les indicateurs utilisés et les perspectives.



RÉSULTATS

Motivations à utiliser l'EA dans leur stratégie « [...] c'est un critère d'avenir [...] »

L'EA est un indicateur clé de durabilité à analyser au sein d'un élevage laitier. Il est donc important de l'intégrer dans la stratégie de l'entreprise.

Estimation de l'EA et valorisation dans l'entreprise

- **Toutes** utilisent le **ratio production laitière/quantité de MS ingérée pour** estimer l'EA.
- La plupart ont conscience des limites de l'indicateur et le corrigent par des facteurs zootechniques : matières utiles du lait (47 % des enquêtés), stade lactation (33 %), pourcentage de primipares (27 %).
« [...] la définition n'est pas la plus parfaite mais (est) applicable sur le terrain [...] »
- L'indicateur de l'EA est une aide pour le **conseil en élevage** ou utilisé comme **argument de vente**. Il majoritairement vu comme un indicateur de performances économiques.

CONCLUSION

- 1 Une filière qui voit un intérêt grandissant à travailler sur l'efficience alimentaire des vaches laitières et qui est consciente des limites actuelles de son utilisation et identifie des freins :
 - La mesure des quantités ingérées (fourrages + concentrés) inaccessible en élevage aujourd'hui
 - Le manque de référence et de clé d'interprétation
 - La difficulté à définir l'efficience alimentaire
- 2 Des questions posées :
 - Définir un indicateur de l'efficience alimentaire applicable sur le terrain.
 - Comprendre les déterminants de l'EA pour pouvoir interpréter l'EA et ses variations.

Auteurs :
Aurore Chanteloube (Agrocampus Ouest), Manon Gicquel (Agrocampus Ouest), Héléne Le Chenadec (Agrocampus Ouest), Marie Leroy (Agrocampus Ouest), Amélie Fischer (Institut de l'Élevage), Lucile Montagne (Agrocampus Ouest / INRA), Julien Jurquet (Institut de l'Élevage)
Contact : julien.jurquet@idele.fr
www.idele.fr



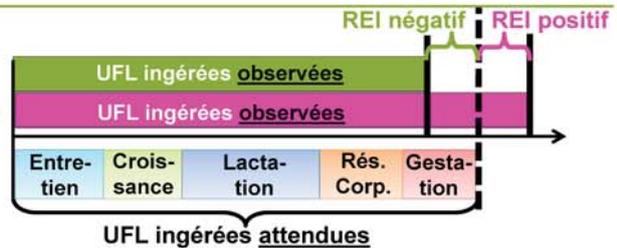
OBJECTIF

Mesurer l'efficacité alimentaire:

Vache efficiente

Vache inefficente

→ difficile et onéreux car nécessitant les quantités ingérées d'aliments



Hypothèse: *intra-ration*, la quantité d'eau bue reflète la quantité ingérée d'aliments



L'efficacité de l'eau bue, estimée avec la température ruminale, reflète-t-elle l'efficacité alimentaire ?

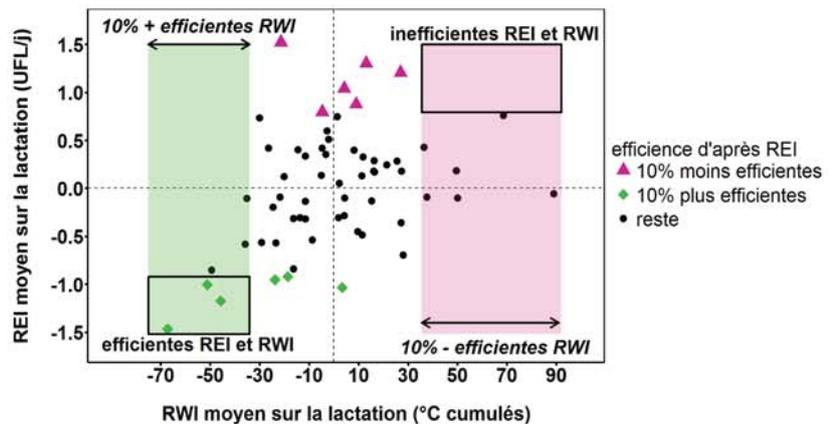
CONCLUSION

L'efficacité de l'eau bue permet d'identifier les vaches les plus efficaces

- Validité sur d'autres rations?
- Validité de la mesure de l'eau bue avec la température ruminale?

RESULTATS

- Les vaches ayant la meilleure efficacité alimentaire sont aussi les plus efficaces sur la quantité d'eau bue
- La corrélation entre efficacité alimentaire et efficacité de l'eau bue est de 0,43

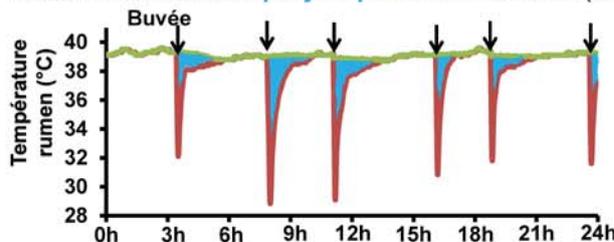


MATERIEL & METHODES

Efficacité de l'eau bue (RWI) = Eau bue observée – Eau bue attendue

Calculée par régression linéaire à partir de **Production Laitière** et du **Poids Vif**

Indicateur de l'eau bue par jour par vache = somme (température corrigée – température brute)



QUI ? 60 vaches Prim'Holstein (30 primi.)
QUAND ? Lactation quasi complète (238 j)
QUOI ?

- Mesure de l'efficacité alimentaire type REI (en UFL)
- Monitoring de la température ruminale (thermobolus San'Phone® MEDRIA)
- 1 ration complète unique sur la lactation

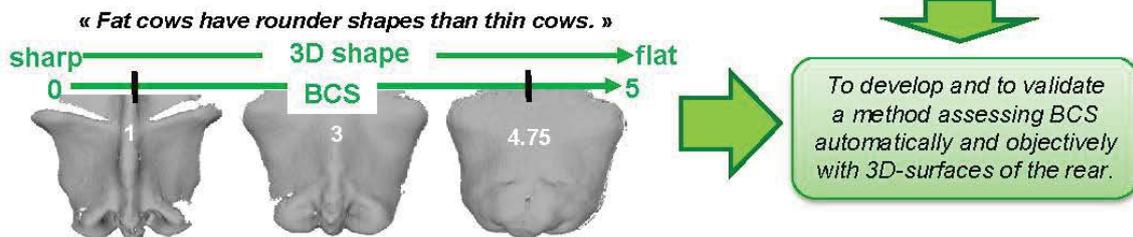
The rear's 3D shape summarized by principal component analysis predicts well body condition score in Holstein dairy cows

Amélie FISCHER (1, 2, 3), Thibault LUGINBUHL(4), Laurent DELATTRE(4) Jean Michel DELOUARD (4) et Philippe FAVERDIN(1)



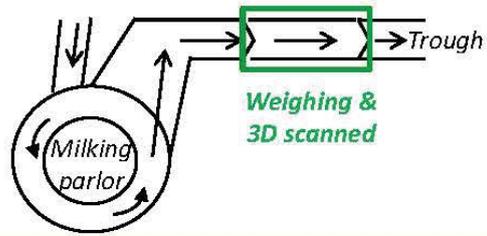
Why focusing on BCS in dairy cattle ?

- To assess body reserves and their variations, important indicators of energy status
- To indirectly monitor reproduction and health performances
- **BCS is too subjective and too little precise** to ensure a precise monitoring throughout the lactation and for a precise high-throughput phenotyping



MATERIAL

- cows of the INRA experimental farm of Méjusseume were scanned on the weighing station at the exit of the milking parlor.
- BCS was estimated by 3 experts monthly on a 0 to 5 scale (Bazin, 1984)



METHOD	1. 3D-surface normalization	2. Calibration	3. Validation	4. Reproducibility
<i>Protocol</i>	<ul style="list-style-type: none"> Identify manually 4 anatomical benchmarks Superimpose the 3d-surfaces used for calibration to find common information Summarizing the 3D-surfaces shape's variability by PCA 	Predict BCS from the coordinates of the 3D-surfaces in the PCA space with a linear regression model	Estimate error of prediction with other surfaces	<ul style="list-style-type: none"> Scanning cows several time each (scanned 8 times each the same day) Estimate error of reproducibility
<i>Nbr cows</i>	56 (BCS 0.5 to 4.75)		2x25 (BCS 0.8 to 2.9)	6 (BCS 1.1 to 4.8)

RESULTS

- **Performing system:** 3 seconds/scan **BUT** about 5 minutes / surface for benchmarks identification
- **A perfect calibration :** the linear model assessing BCS with 3D-coordinates in the PCA space ($R^2 = 1$ SD = 0)
- **A good validation:** when estimating BCS with new 3D-surfaces, the error of prediction is about 0.32.
- **A reproducible method:** the 3D-system automatically includes an error of 0.10 unit of BCS, whereas manually scored BCS automatically includes an error of 0.28 unit of BCS.

CONCLUSION

- The PCA treatment of the 3D-shape of the rear is efficient to predict manually scored body condition .
- Assessing BCS with 3D surfaces is precise (BCS +/- 0.32) and 2.8 times more reproducible than manual BCS
 - promising phenotyping tool
 - better characterize the association between body condition's variation throughout the lactation and health and reproduction performances ?
- **Essential improvement :** an entire automation of the 3D-surface process

(1) INRA UMR PEGASE, F-35590 St-Gilles, France
 (2) Agrocampus-Ouest UMR PEGASE, F-35000 Rennes, France
 (3) Institut de l'Elevage, F-35650 Le Rheu, France
 (4) 3DOuest Lannion, F-22300 Lannion, France
 Corresponding author : philippe.feverdine@rennes.inra.fr
 Presenting author : clement.aislin@idele.fr

For further information:
EAAP presentation Monday the 25th. August 2014

PREDIRE L'EFFICIENCE ALIMENTAIRE À PARTIR DU SUIVI DE LA TEMPERATURE RUMINALE

A. FISCHER (1, 2) ET P. FAVERDIN(2)

(1) INSTITUT DE L'ELEVAGE, 35650 LE RHEU, FRANCE

(2) PEGASE, AGROCAMPUS-OUEST, INRA, 35590 SAINT-GILLES, FRANCE

Thèse

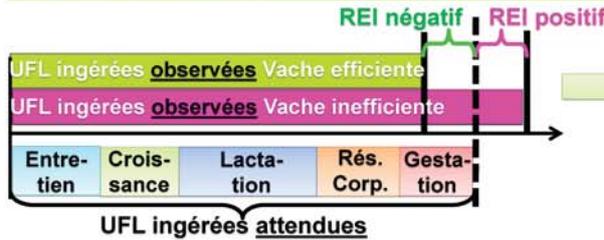
Etape 1: Construire un indicateur indirect pour mesurer l'efficacité alimentaire

Etape 2: Identifier les mécanismes biologiques expliquant les différences d'efficacité alimentaire

Amélioration de l'efficacité alimentaire de la vache
= moins consommation alimentaire pour autant ou plus de produits
= élevage plus compétitif et moins de rejets azotés et GES

Meilleure durabilité économique + environnementale

ETAPE 1: Mesurer l'efficacité alimentaire



Mesurer l'efficacité alimentaire

= difficile et onéreux car nécessitant les quantités ingérées d'aliments

Hypothèse: La quantité d'eau consommée reflète la quantité ingérée d'aliments

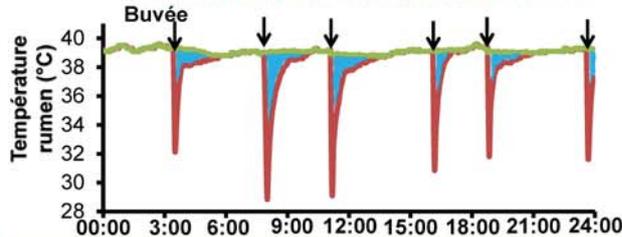
L'efficacité de l'eau consommée, estimée avec la température ruminale, reflète-t-elle l'efficacité alimentaire ?

MATERIEL & METHODES

Efficacité de l'eau consommée (RWI) = Eau consommée observée - Eau consommée attendue

Calculée par régression linéaire à partir de **Production Laitière** et du **Poids Vif**

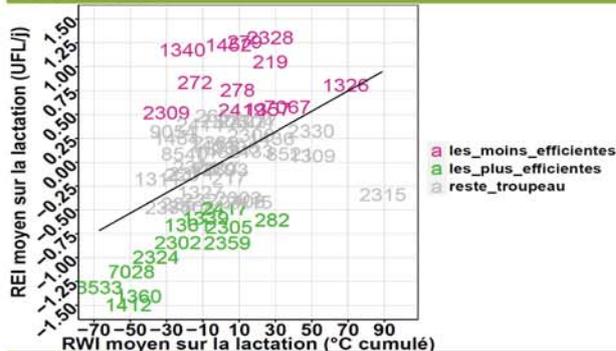
Estimation de l'eau consommée par jour par vache = somme (température corrigée - température brute)



QUI ? 60 vaches Prim'Holstein (30 primi.)
QUAND ? Lactation quasi complète (238 j)
QUOI ?

- Mesure de l'efficacité alimentaire type REI (en UFL)
- Monitoring de la température ruminale (thermobolus MEDRIA)
- 1 ration complète unique sur la lactation

RESULTATS



RWI est corrélé positivement à REI ($r = 0,47$) et explique 20% de la variabilité du REI ($R^2 = 0,2$).

		REI			Total
		Efficientes	Reste	Inefficientes	
R	Efficientes	6	5	1	12
	Reste	5	25	6	36
I	Inefficientes	1	6	5	12
	Total	12	36	12	60

CONCLUSION

L'efficacité alimentaire est mesurable par l'efficacité de l'eau consommée, estimée avec la température ruminale, le Poids Vif et la Production Laitière.

L'efficacité de l'eau consommée n'identifie que 50% des vaches réellement efficaces ou inefficaces.

A VENIR:

- Valider l'estimation de l'eau consommée à partir de vraie consommation d'eau
- Valider cette estimation du REI par RWI sur des données externes (ferme des Trinottières)
- Améliorer l'indicateur en intégrant par exemple d'autres variables (E.T. température journalière)

EVALUER L'ÉTAT CORPOREL DES VACHES LAITIÈRES PAR IMAGERIE 3D

A. FISCHER (1, 2), T. LUGINBUHL(3), L. DELATTRE(3) J.M. DELOUARD (3) ET P. FAVERDIN(1)

(1) PEGASE, AGROCAMPUS-OUEST, INRA, 35590 SAINT-GILLES, FRANCE
(2) INSTITUT DE L'ELEVAGE, 35650 LE RHEU, FRANCE
(3) 3DOUEST LANNION, 22300 LANNION, FRANCE



Caméra d'acquisition de la forme 3D



L'état corporel est un bon indicateur :

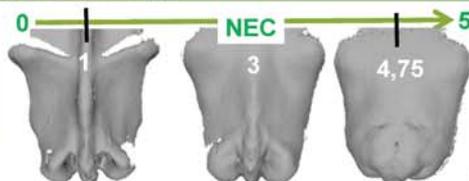
- de l'état et la variation d'état des réserves corporelles
- des risques pour la santé et la reproduction

Actuellement, mesurée par la note d'état corporel (NEC) visuellement ou par palpation d'après une grille (Bazin, 1984).

→ Méthode **trop subjective**, **assez peu répétable** et **chronophage**

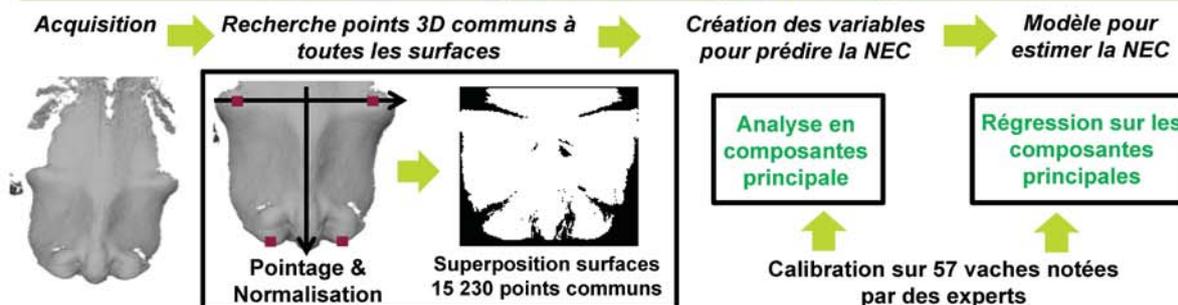
OBSERVATIONS

« les vaches grasses ont des formes plus rondes que les vaches maigres »



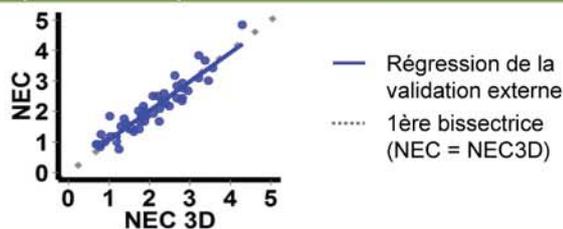
Développer et valider une méthode d'évaluation **automatique et objective** de la Note d'Etat Corporel par imagerie **3D**

METHODOLOGIE: apprendre à noter à partir des images 3D



RESULTATS: une méthode simple et prometteuse pour noter les bovins

- **Performante** : 3 secondes/scan
- **Bonne Validation externe** : Erreur de prédiction de 0,32 point de NEC
- **Reproductible** : 0,10 point de NEC vs 0,28 pour la NEC par les experts



CONCLUSION

- Le traitement par ACP des formes 3D du bassin des vaches laitières permet une bonne estimation de la note d'état corporel
- La méthode est plus précise et plus reproductible que la notation par des experts
 - Un outil prometteur pour mesurer ce caractère chez les bovins
 - Un outil innovant pour l'élevage de précision
- Amélioration en cours : automatisation complète du processus et réduction du temps d'acquisition

Pour aller plus loin: Fischer A., Luginbühl T., Delattre L., Delouard J.-M. et Faverdin P., 2015. Rear shape in 3D summarized by principal component analysis is a good predictor of body condition score in Holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science*; 98 : 4465-4476.



Evaluer l'état corporel des vaches laitières par imagerie 3D

A. FISCHER (1, 2), T. LUGINBUHL(3), L. DELATTRE(3) J.M. DELOUARD (3) et P. FAVERDIN(1)



(1) Pegase, Agrocampus-Ouest, INRA, 35590 Saint-Gilles, France
 (2) Institut de l'Élevage, 35650 Le Rheu, France
 (3) 3DOuest Lannion, 22300 Lannion, France

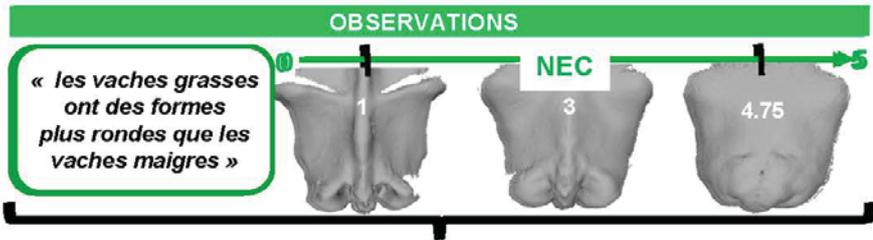
Caméra d'acquisition de la forme 3D



L'état corporel est un bon indicateur :

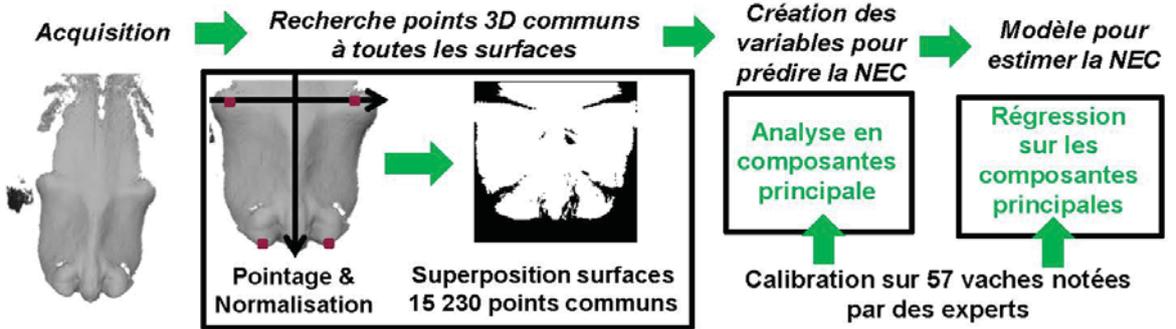
- de l'état et la variation d'état des réserves corporelles
- des risques pour la santé et la reproduction

Actuellement, mesurée par la note d'état corporel (NEC) visuellement ou par palpation d'après une grille (Bazin, 1984).
 → Méthode trop subjective, assez peu répétable et *chronophage*



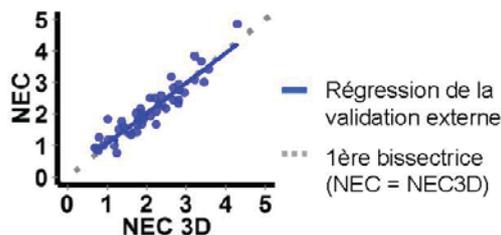
Développer et valider une méthode d'évaluation automatique et objective de la Note d'Etat Corporel par imagerie

METHODOLOGIE : apprendre à noter à partir des images 3D



RESULTATS : une méthode simple et prometteuse de notation des bovins

- **Performante :** 3 secondes/scan
- **Bonne Validation externe :** Erreur de prédiction de 0,32 point de NEC
- **Reproductible :** 0,10 point de NEC vs 0,28 par les experts.



CONCLUSION

- Le traitement par ACP des formes 3D du bassin des vaches laitières permet une bonne estimation de la note d'état corporel
- La méthode est plus précise et plus reproductible que la notation par des experts
 - Un outil prometteur pour mesurer ce caractère chez les bovins
 - Un outil innovant pour l'élevage de précision
- Amélioration en cours : automatisation complète du processus et réduction du temps d'acquisition

Pour aller plus loin: Fischer A., Luginbühl T., Delattre L., Delouard J-M. et Faverdin P., 2015. Rear shape in 3D summarized by principal component analysis is a good predictor of body condition score in Holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science*; 98 : 4465-4476.

Fiches techniques

Fischer A, Jurquet J, Ballot N and Minery S 2015a. Mieux comprendre l'efficience alimentaire des vaches laitières. In (Ed. C Institut de l'élevage), p. 6. CNIEL, Institut de l'élevage, Paris, France.

Minery S, Ballot N, **Fischer A**, Rouillé B and Jurquet J 2017. Comprendre les facteurs de variation de l'efficience alimentaire des vaches laitières - Programmes de recherche DEFFILAIT et MICROFICIENT. In (Ed. Id l'élevage), p. 6. Institut de l'élevage.

Mieux comprendre l'efficacité alimentaire des vaches laitières

Dans un contexte de compétitivité, les éleveurs s'efforcent d'améliorer l'efficacité technico-économique de leurs élevages. L'alimentation représente en moyenne 70% des charges opérationnelles. Optimiser l'efficacité alimentaire des vaches laitières est une des voies étudiées. Cette fiche présente des notions clés pour mieux appréhender les travaux.

Pourquoi des vaches efficaces? Deux raisons essentielles

Des élevages plus compétitifs. En élevage laitier, le poste « alimentation » représente en moyenne plus de 70% des charges opérationnelles. Des vaches plus efficaces valoriseront mieux leurs rations pour accroître la compétitivité des élevages.

Un enjeu majeur face à l'augmentation de la population mondiale. Seuls les ruminants transforment la cellulose en aliments consommables par l'homme. Des vaches plus efficaces permettront de produire plus avec moins de ressources.

Qu'est ce qu'une vache efficace ?

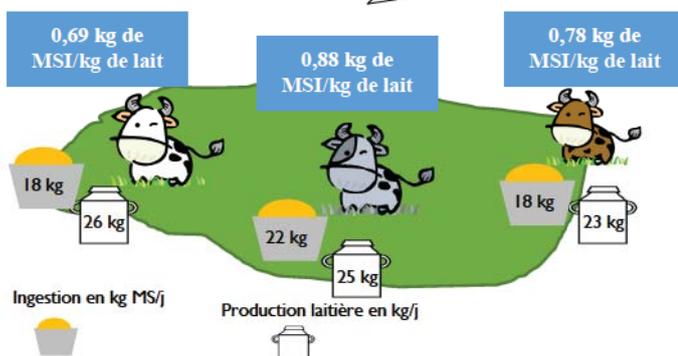


Une vache laitière efficace est une vache qui va optimiser l'utilisation de l'aliment ingéré pour produire du lait en quantité et qualité tout en maintenant l'ensemble de ses fonctions physiologiques (aptitude à la reproduction, résistance aux maladies ...).

Quizz !

1/ Quelle est la vache la plus efficace ?

Apparemment  est plus efficace que  et  car elle produit plus de lait par unité d'aliment ingéré.



2/ Regardons leurs performances....

Puise-t-elle dans ses réserves corporelles ? Quelles quantités de matières utiles dans le lait produit-elle ? A-t-elle des problèmes de reproduction ? Des problèmes sanitaires ? ...

			
kg de MSI/kg de lait	0,69	0,88	0,78
TB (g/kg)	40,5	41,0	43,2
TP (g/kg)	31,0	31,5	32,0
Variation d'état corporel	=	+ 1,0	+ 0,5
Intervalle vêlage/vêlage	430 j	400 j	380 j
IA/IAF	3	3	2

3/ En conclusion

 a des taux plus élevés, une meilleure fertilité. Elle apparaît donc plus efficace que les deux autres vaches.

En conclusion.

Plusieurs paramètres sont à prendre en compte pour une mesure robuste de l'efficacité alimentaire de la vache laitière.

Quels indicateurs de l'efficacité alimentaire chez la vache laitière ?

Deux types d'indicateurs de l'efficacité alimentaire sont utilisés

L'INDICE DE CONSOMMATION ¹

$$IC = \frac{\text{Quantité ingérée d'aliments}}{\text{Quantité de produit (lait, viande)}}$$

Plus l'IC est faible, plus la vache est efficace.

1. en anglais FCR = Feed Conversion Ratio

L'INGÉRÉ RÉSIDUEL ²

IR = ingestion mesurée - ingestion calculée à partir d'un modèle qui utilise différents paramètres : poids, variation poids, MP, MG, âge, stade lactation...

Plus IR est négatif, plus la vache est efficace car elle ingère moins que ce dont elle a, à priori, besoin.

2. en anglais RFI = Residual Feed Intake

« Je mange moins que ma voisine et je produis autant de lait qu'elle : je suis plus efficace que ma voisine » !



« J'aurais dû manger « tant de kg de ration » pour produire « tant de kg de lait et de viande », pour entretenir mon état corporel, pour ma reproduction... Mais j'ai mangé moins que prévu : je suis donc plus efficace que la moyenne des vaches de mon troupeau. »

Avantages et inconvénients de ces deux indicateurs

	Indice de Consommation	Ingéré Résiduel
Avantages	Deux paramètres à mesurer ; Plutôt rapide et simple	Approche plus complète : inclut plus de postes de dépenses énergétiques
Inconvénients	Ne prend pas en compte les autres fonctions métaboliques Difficile à utiliser en sélection ³ Très lié à la production laitière (critère redondant avec la sélection actuelle).	Beaucoup de paramètres à mesurer : lourd et coûteux. Plusieurs modèles possibles pour déterminer « l'ingestion calculée » ; lequel choisir ? Nécessite des méthodes de mesure assez précises pour mettre en évidence des différences entre vaches.
Dans les systèmes d'élevage actuels pas de mesure des quantités d'aliments distribuées et refusées pour accéder à l'ingéré. Seules certaines stations expérimentales sont équipées pour réaliser ces mesures.		

3. Les ratios ne sont pas recommandés en sélection, car on ne sait pas quels types d'animaux seront favorisés : faible quantité d'aliments ingérés ou forte production laitière ?

Les indicateurs IC et IR ne sont pas toujours équivalents selon les vaches

Les travaux conduits en France sur l'efficacité alimentaire des vaches laitières montrent que l'IR et IC ne mesurent pas les mêmes choses et n'aboutissent donc pas aux mêmes classements au sein d'un même troupeau.

Explication.

Deux vaches peuvent avoir le même indice de consommation, IC, si elles ont les mêmes quantités ingérées et de lait produit.

Mais, l'une ayant plus mobilisé ses réserves corporelles que l'autre, elle sera moins efficace d'après son IR.

En conclusion

Il est nécessaire d'approfondir les connaissances sur l'efficacité alimentaire pour définir les meilleurs indicateurs, car
a/ Ceux utilisés aujourd'hui (IC et IR) ne font pas consensus dans la communauté scientifique
b/ Ils ne sont pas mesurables au niveau de la vache (en dehors des fermes expérimentales qui disposent des quantités ingérées individuelles).

Des travaux de recherche pour des indicateurs en élevage

Des programmes de recherche ont débuté pour :

- mieux comprendre les mécanismes impliqués dans les différences individuelles d'efficience alimentaire,
- construire le ou les indicateurs robustes de l'efficience alimentaire,
- étudier des stratégies d'amélioration de l'efficience alimentaire,
- à terme, rendre les indicateurs accessibles en élevage, à faible coût, grâce aux nouvelles technologies.

Les différentes étapes du programme



Etape 1

Améliorer la qualité des mesures de certains caractères pour pouvoir mettre en évidence des différences entre individus :
Par exemple, la variation des réserves corporelles (par imagerie 3D).



Etape 2

Identifier les facteurs qui expliquent les différences d'efficience alimentaire observées entre individus.

Identifier, parmi les facteurs candidats (*production laitière, mobilisation des réserves corporelles, régulation de la température corporelle, activité, digestion*), ceux qui expliquent les variations de l'efficience alimentaire.

Identifier la(les) période(s) minimale(s) de mesure nécessaire(s) pour estimer l'efficience alimentaire de façon fiable. *Par exemple en comparant l'efficience alimentaire mesurée sur toute une lactation à l'efficience alimentaire mesurée sur une partie de la lactation (quelques semaines ou quelques mois ?).*

Construire un ou plusieurs indicateurs de l'efficience alimentaire à partir des facteurs identifiés pertinents et mesurés sur la période identifiée à l'issue de l'étape 2.



Etape 3

Tester les indicateurs construits pour vérifier :

1. Qu'ils ne dégradent pas d'autres variables d'intérêt en élevage.
Par exemple, les vaches identifiées comme efficaces ont-elles de bonnes performances de reproduction et de santé ?
2. Qu'ils restent valables dans tous les systèmes d'élevage.
Par exemple, les vaches identifiées comme efficaces dans un système A le sont-elles toujours dans un système B ?



Etape 4

Rendre l'efficience alimentaire utilisable au quotidien en élevage

En définissant des stratégies d'amélioration de l'efficience alimentaire : en utilisant la voie de l'amélioration génétique et / ou celle de l'alimentation de précision (cf. page 5)

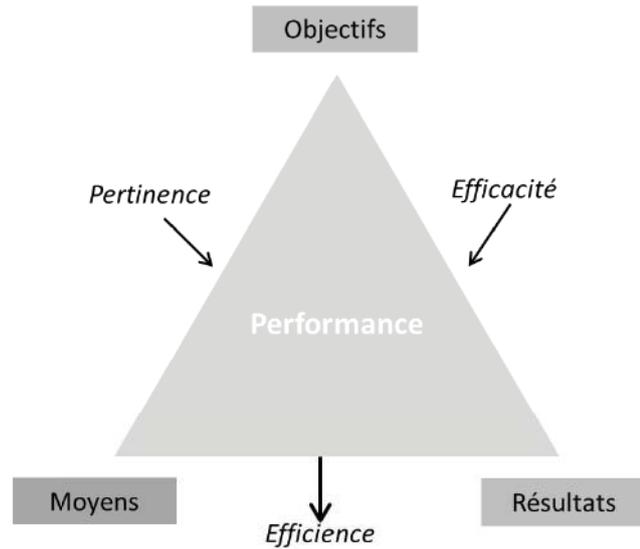
Pourquoi ? Identifier les vaches les moins efficaces et **améliorer leur efficience** par exemple par l'alimentation de précision ; **Adopter une alimentation de précision** pour réduire les dépenses alimentaires et le gaspillage d'aliments..

Comment ? Mesurer les facteurs identifiés à l'étape 2bis. La plupart des facteurs candidats sont ou seront mesurables en élevage (cf. paragraphe page 4 sur les nouvelles technologies en élevage)

Vache efficace ou efficiente ?

L'**efficacité** est l'adéquation entre résultats et objectifs, tandis que l'**efficience** est l'adéquation entre les moyens déployés et les résultats.

La vache la plus efficiente sera celle qui aura mobilisé le moins de ressources alimentaires pour atteindre un même résultat (bonnes production laitière et performances de reproduction et de santé).



Source : **Le système alimentaire mondial** (Jean-Louis Rastoin, Gérard Ghers, 2010, QUAE Ed.)

L'apport potentiel des nouvelles technologies pour estimer l'efficience alimentaire

Caractères mesurés	Exemples d'outils de mesure	Installation	Accessible aujourd'hui	Accessible demain ?
Quantité de Lait / TB / TP	Compteur à lait	Robot ou contrôle de performance		
Poids vif	Stalle de pesée	1/troupeau (indépendante ou robot)		
Note d'état corporel	Caméra 3D (combinée à une stalle pesée ou à robot de traite)	1/troupeau		
Température corporelle	Thermobolus ruminal	1/vache		
	Thermomètre auriculaire	1/troupeau		
Activité (durée rumination, durée d'ingestion, activité physique...)	Accéléromètre ou podomètre	1/vache		

commercialisé et abordable

commercialisé mais coût élevé

commercialisé mais coût très élevé

NC non commercialisé

données non collectées

données collectées mais pas/peu utilisées

données collectées en routine

Remarque : La stalle de pesée représente un coût important à l'achat mais dont l'investissement par vache diminue avec le nombre de vaches. Les capteurs individuels (1/vache) peuvent représenter un coût important à l'échelle du troupeau mais sont utilisables plusieurs années (NB : les thermobolus ruminiaux restent dans le rumen de la vache toute sa vie).

Quelles sont les pistes potentielles pour améliorer l'efficacité alimentaire des vaches laitières ?

La sélection génomique

L'efficacité alimentaire est un caractère qui pourrait être sélectionné à moyen terme. Plusieurs pistes complémentaires sont envisageables.

Collecte en routine dans les troupeaux des facteurs de l'efficacité alimentaire identifiés grâce aux programmes de recherche.

Construction d'une population de référence* (nationale, voire internationale) de taille suffisante** basée sur les données des fermes expérimentales avec suivi des ingestions individuelles.

* population où les vaches sont à la fois génotypées et bien connues pour les critères d'efficacité alimentaire
** au moins 10 000 vaches et 2 à 3000 de plus/an pour renouveler la population

Sélection génomique

La stratégie de sélection sur ce caractère doit être modélisée et largement discutée par les instances professionnelles. **La définition précise de l'objectif est un préalable à la mise en place de la sélection.** La relation avec les autres caractères d'intérêt doit être connue pour ne pas détériorer d'autres critères (la santé, la reproduction ...).

L'alimentation de précision



Le développement de **nouvelles technologies dans les élevages permettra de mieux raisonner l'alimentation au niveau individuel.** Par exemple, certains robots de traite enregistrent le poids quotidien des vaches. Leur activité journalière peut également être connue grâce à des capteurs.

En intégrant toutes les informations disponibles sur l'animal (production laitière, variation de poids, activité etc ...), il sera possible de **connaître l'efficacité de chaque vache du troupeau.** Les distributeurs automatiques de concentrés et les automates d'alimentation permettent d'individualiser, par vache ou lot de vaches, une partie (ou la totalité) de la ration. **Il sera alors possible d'ajuster quotidiennement les apports alimentaires de chaque vache en fonction de son efficacité.**

Les fermes expérimentales où sont étudiées l'efficacité alimentaire

Installation expérimentale INRA de Méjusseau
(Le Rheu, 35)



60 vaches Prim'Holstein suivies sur toute la lactation. Pour chaque vache enregistrement de ses données de production laitière, son poids, sa note d'état corporel, sa NEC-3D, sa température corporelle, son activité et son ingestion. Suivi sanguin du métabolisme énergétique.

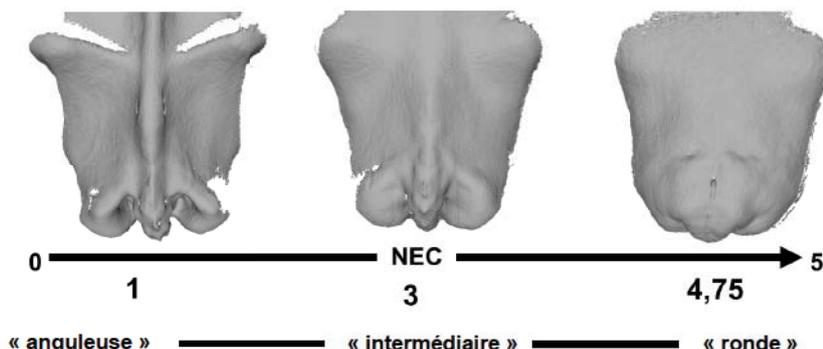
Ferme expérimentale des Trinottières (CA 49)



60 vaches Prim'Holstein suivies sur toute la lactation. Collecte des données d'ingestion, de production laitière, de poids vif, de note d'état corporel, d'activité, et, sur une partie du troupeau, enregistrement de la température corporelle.

La NEC 3D

Le principe repose sur l'utilisation d'une image en 3D du bassin de la vache pour estimer objectivement et quasi automatiquement son état d'engraissement (note d'état corporel)



Forme surface 3D

A. Fischer et al, 2014

Pour en savoir plus

Berry D.P. et Crowley J.J. (2013). *CELL BIOLOGY SYMPOSIUM: Genetics of feed efficiency in dairy and beef cattle*, Journal of Animal Science, 91 : 1594-1613.

Faverdin P. (2013). *De l'efficacité à l'efficience : un changement de paradigme pour la recherche ?* En Phase : la lettre d'information du Département Physiologie Animale et Systèmes d'Élevage, numéro 49, juillet 2013.

Fischer A., Luginbühl T., Delattre L., Delouard J.M. et Faverdin P. (2014). *Améliorer la mesure de l'état des réserves corporelles des vaches laitières en analysant la surface 3D du dos de la vache*. Rencontres, Recherches, Ruminants 2014.

Herd R.M. et Arthur P.F. (2008). *Physiological basis for residual feed intake*. Journal of Animal Science, 87: 64-71.

Phocas F., Agabriel J., Dupont-Nivet M., Geurden I., Médale F., Mignon-Grasteau S., Gilbert H. et Dourmas J.Y. (2014). *Le phénotype de l'efficacité alimentaire et de ses composantes, une nécessité pour accroître l'efficience des productions animales*. INRA Productions Animales, 27 (3) : 235-248.

Document rédigé par Amélie Fischer (Institut de l'Élevage/INRA), Julien Jurquet (Institut de l'Élevage), Stéphanie Minery (Institut de l'Élevage), Nadine Ballot (CNIEL),

Avec nos remerciements à Philippe Faverdin (INRA) et Marie-Pierre Jaqueroud (Institut de l'Élevage)

Crédit photo : Jean-Luc Menard (Institut de l'Élevage), Christophe Maitre (INRA)

Mai 2015





Comprendre les facteurs de variation de l'efficacité alimentaire des vaches laitières

Programmes de recherche
DEFFILAIT et MICROFICIENT

L'efficacité alimentaire des vaches laitières est l'un des paramètres-clés de la rentabilité des exploitations. Dans les faits, le niveau de valorisation de la ration est très variable d'un animal à l'autre.

Les programmes de recherche **DEFFILAIT** et **MICROFICIENT**, mis en place en 2016, permettront de mieux comprendre d'où viennent les différences d'efficacité alimentaire observées entre vaches laitières. Il s'agit d'identifier des indicateurs faciles à mesurer en élevages, sur lesquels il sera possible d'agir pour améliorer l'efficacité alimentaire des vaches laitières. La sélection génomique et l'alimentation de précision sont des pistes prometteuses.

Une *“vache laitière efficace”* optimise l'utilisation de l'aliment ingéré pour produire du lait en quantité et qualité tout en maintenant l'ensemble de ses fonctions physiologiques (aptitude à la reproduction, résistance aux maladies...)

DEFFILAIT est conduit par :



MICROFICIENT est conduit par :

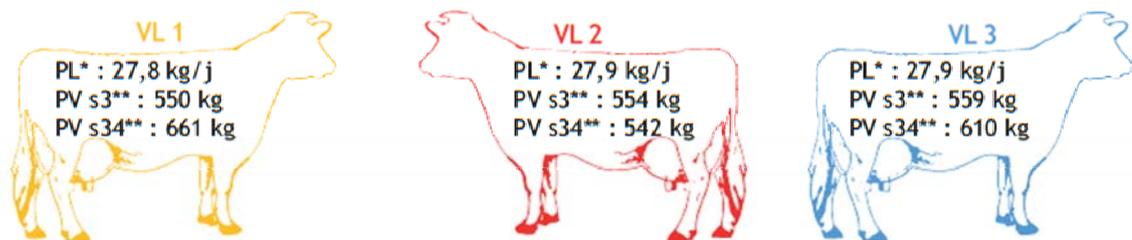


SUIVRE QUOTIDIENNEMENT LES PARAMÈTRES DES VACHES LAITIÈRES

POUR COMPRENDRE L'ORIGINE DES DIFFÉRENCES D'EFFICIENCE ALIMENTAIRE ENTRE ANIMAUX, PLUSIEURS PARAMÈTRES PHYSIOLOGIQUES DOIVENT ÊTRE SUIVIS AU NIVEAU INDIVIDUEL AU COURS DE LA LACTATION.

Un exemple de différents profils d'ingestion et de Note d'Etat Corporel (NEC)

Prenons l'exemple de 3 vaches primipares de race Prim'Holstein suivies en 2016 à la ferme expérimentale des Trinottières (49) entre les 3^{ème} et 34^{ème} semaines de lactation, et présentant le même poids vif après mise-bas et la même moyenne de production laitière journalière. On pourrait s'attendre à ce qu'elles aient les mêmes besoins énergétiques et donc consomment la même quantité de matière sèche (MS) pour couvrir leurs besoins.



* Moyenne de la production laitière journalière entre les semaines 3 et 34 de lactation

** Poids vif mesuré en semaine 3 (s3) et semaine 34 (s34) de lactation

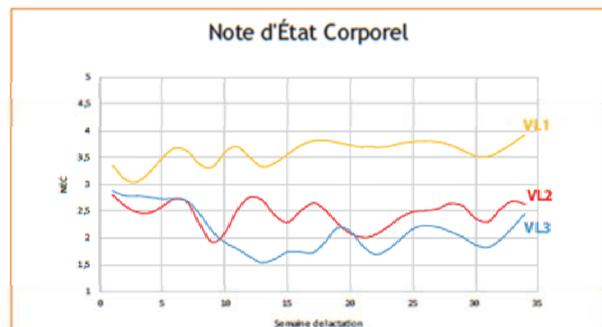
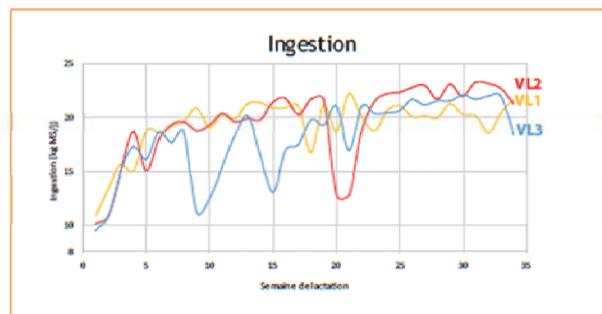
En réalité les matières sèches ingérées (MSI) sont différentes entre les 3 vaches. VL3 a ingéré moins que VL1 et VL2 (18 kg/j pour VL3 contre 19,5kg/j en moyenne pour VL1 et VL2).

Mais VL3 a davantage mobilisé ses réserves corporelles : elle a perdu beaucoup plus d'état corporel que VL1 et VL2.

On note également que VL1 et VL2 ont des profils d'ingestion comparables, avec une même production laitière moyenne, mais n'ont pas du tout les mêmes évolutions de la NEC (baisse chez VL2 et hausse chez VL1).

Comment expliquer ces différences ?

Dans le cadre des programmes DEFFILAIT et MICROFICIENT, l'ensemble des facteurs à l'origine des dépenses énergétiques des animaux sera suivi. Ces mesures permettront d'expliquer ces profils variés et de comprendre les différences d'efficacité alimentaire entre animaux (cf. pages ci-contre).



Source : Données DEFFILAIT 2016, Ferme expérimentale des Trinottières (Chambre d'agriculture du Maine et Loire).

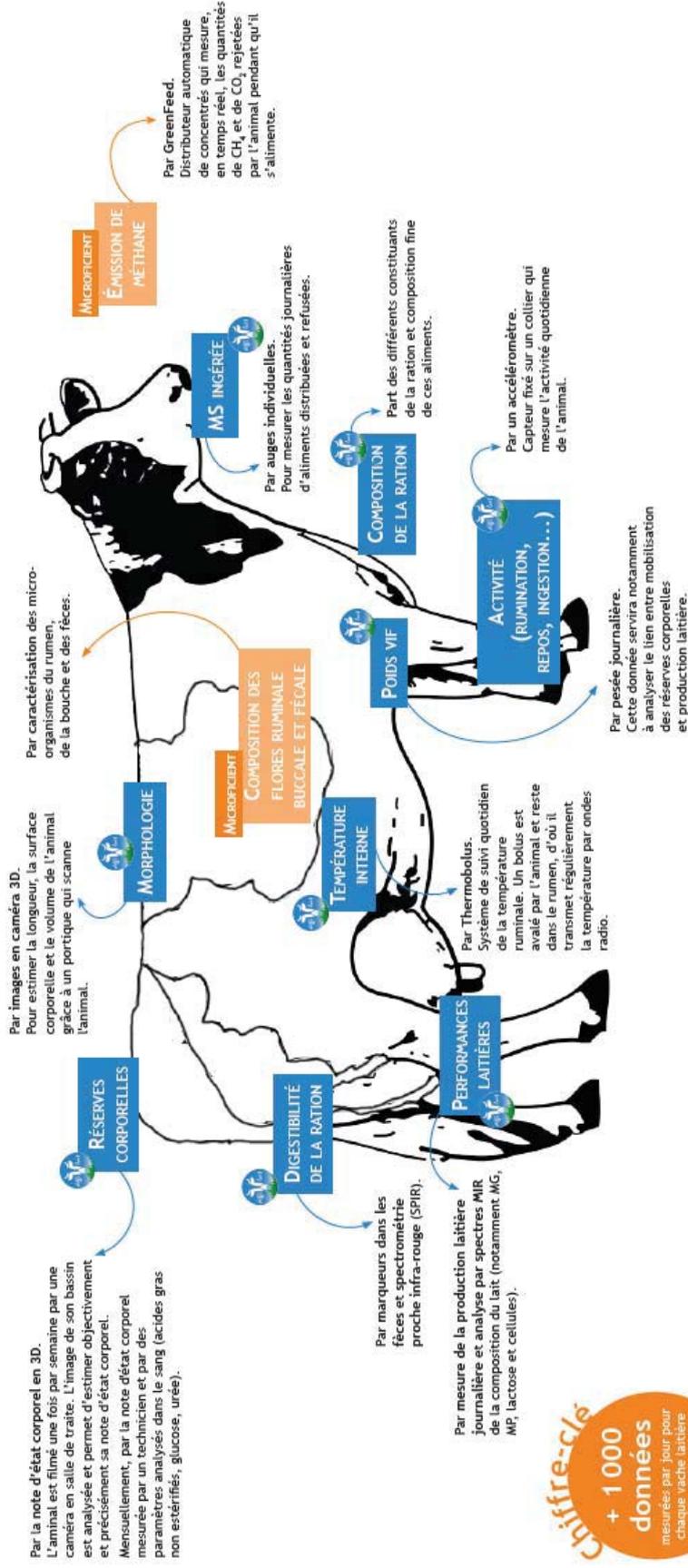
POUR ÊTRE AU CŒUR DE LA MÉCANIQUE ET MIEUX COMPRENDRE LES CLÉS DE L'EFFICACITÉ ALIMENTAIRE

DANS LES 3 FERMES EXPÉRIMENTALES PARTENAIRES DES PROGRAMMES DEFFILAIT ET MICROFICIENT ET DANS UNE 60^{ème} DE FERMES COMMERCIALES AVEC ROBOT DE TRAITE, DE NOMBREUSES VARIABLES VONT ÊTRE MESURÉES. L'ANALYSE DE CES DONNÉES VA PERMETTRE DE DÉCOMPOSER LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DE L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE ET DE LA RATION, DEPUIS LA DIGESTION JUSQU'À LA SYNTHÈSE DU LAIT EN PASSANT PAR LE MAINTIEN DE LA TEMPÉRATURE CORPORELLE ET LA VARIATION DES RÉSERVES CORPORELLES.

TÉMOIGNAGE de Jean-Michel Lamy,
Responsable de la Ferme Expérimentale des Trinitières (49)

Les vaches efficaces ne sont pas celles que l'on croit.

"Les vaches laitières de la ferme expérimentale des Trinitières ont fait l'objet d'une analyse préalable au projet DEFFILAIT. Leurs données de production, d'ingestion, de poids... ont été passées au crible de l'efficacité alimentaire. La présentation des résultats et le classement des animaux sur une échelle d'efficacité a suscité des réactions et des surprises auprès de l'équipe d'animalier. Et oui ! Les vaches efficaces ne sont pas toujours celles que l'on croit. L'utilisation de nouveaux capteurs dans le cadre du projet DEFFILAIT nous amène à regarder les animaux sous un autre œil. Ces données apportent des informations nouvelles comme la température ruminale et le comportement alimentaire."



Chiffres-clés
+ 1 000
données
mesurées par jour pour
chaque vache laitière
des fermes
expérimentales

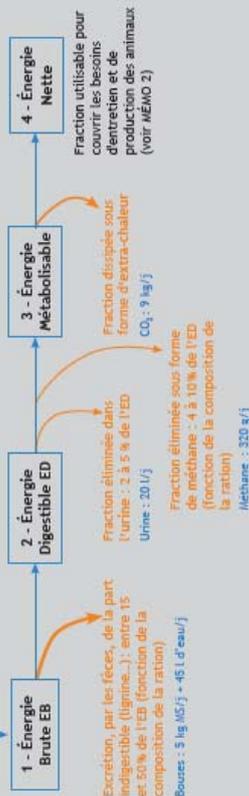
MEMO

VALORISATION DE LA RATION ET BESOINS DES VACHES LAITIÈRES

UNE VACHE LAITIÈRE EFFICACITE EST CAPABLE DE MAXIMISER L'UTILISATION DE L'ALIMENT INGERE POUR PRODUIRE DU LAIT EN QUANTITE ET DE QUALITE TOUT EN MAINTENANT L'ENSEMBLE DE SES FONCTIONS PHYSIOLOGIQUES (APTITUDE A LA REPRODUCTION, RESISTANCE AUX MALADIES ...). RAPPEL DES ETAPES DE VALORISATION DE LA RATION ET DES FACTEURS DE VARIATION DES BESOINS DES VACHES LAITIÈRES.

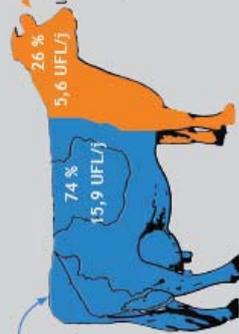
MÉMO 1 LES ÉTAPES DE L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE DE LA RATION PAR LES VACHES LAITIÈRES

Quantité ingérée → Dépend de la capacité d'ingestion de la vache et de l'ingestibilité de la ration



MÉMO 2 LES BESOINS DES VACHES LAITIÈRES ET LEURS PRINCIPAUX FACTEURS DE VARIATION

Les besoins de production comprennent les besoins de croissance et de (re)constitution des réserves corporelles, les besoins de lactation et les besoins de gestation.



→ PRINCIPAUX FACTEURS DE VARIATION DES BESOINS
Dignité, Alimentation des bords, oméga et copriné, Itra, IPRB.

- Stade de gestation
- 0,6 UFL/J lors du 7^e mois
- 1,6 UFL/J lors du 7^e mois
- 2,7 UFL/J lors du 9^e mois
- Niveau de production laitière (à 4 % de MS)
- Reconstitution des réserves adipeuses
- 4,5 UFL/kg de gain de poids

- Conditions de vie
- 10 % au pâturage (par rapport à la stabulation)

Les données des mémos 1 et 2 sont valables pour une vache de 700 kg, produisant 35 kg lait/J et recevant une ration ensilage de maïs/ensilage d'herbe :
• MS ingérée : 22 kg/J
• Eau totale : 140 l/J dont 100 l bus

POURQUOI CERTAINES VACHES SONT PLUS EFFICIENTES QUE D'AUTRES ?

DIGÈRENT-ELLES MIEUX ? ONT-ELLES MOINS DE PERTES SOUS FORME DE CHALEUR ? GÉRBENT-ELLES LEURS RÉSERVES CORPORELLES DE MANIÈRE TRÈS SPÉCIFIQUE ? POUR RÉPONDRE À CES QUESTIONS, DEUX PROGRAMMES DE RECHERCHE COMPLÉMENTAIRES SONT MIS EN PLACE.



DEFFILAIT

Déterminer les facteurs de variation de l'efficacité alimentaire

- Quels sont les facteurs qui expliquent les différences d'efficacité alimentaire entre les individus : digestibilité, activité, mobilisation des réserves corporelles... ?
- Comment construire des indicateurs faciles à mesurer dans les troupeaux ?
- Sur quels critères trier et sélectionner les animaux ?

MICROFICIENT

Étudier si la flore digestive et l'efficacité alimentaire sont liées

- Existe-il un lien entre la composition en micro-organismes de la flore ruminale de l'animal et ses capacités à digérer, son efficacité alimentaire et ses émissions de méthane ?
- Quelles relations entre les différentes flores, buccale, ruminale et fécale ?

QUELLES RETOMBÉES POUR LES ÉLEVAGES LAITIERS ?

CONCRÈTEMENT, CES TRAVAUX VISENT À AMÉLIORER L'EFFICACITÉ ALIMENTAIRE DES VACHES LAITIÈRES SAIS DÉTÉRIORER LEURS AUTRES APTITUDES (RÉSISTANCE AUX MALADIES, REPRODUCTION). DEUX PRINCIPALES PISTES SONT ÉTUDIÉES, POUR FAIRE DE L'EFFICACITÉ ALIMENTAIRE UN CRITÈRE-CLÉ POUR LE CONSEIL EN ÉLEVAGE.

Une alimentation de précision individualisée

Grâce au développement des nouvelles technologies, des indicateurs seront mesurables en routine (activité des vaches, poids vif). Ces données serviront à déterminer l'efficacité alimentaire de chacune des vaches du troupeau et à ajuster leur ration. Les distributeurs automatiques de concentrés et les automates d'alimentation permettront d'individualiser la ration (par vache ou par lot).

Une sélection génomique sur l'efficacité alimentaire

D'ici 5 ans, des valeurs génétiques sur l'efficacité alimentaire des vaches laitières devraient être proposées. Le suivi de quelques milliers d'animaux, constituant la population de référence, est suffisant pour mettre en place une évaluation génomique sur un critère donné. Pour l'efficacité alimentaire, les données d'ingestion individuelle pourront provenir des fermes expérimentales et être complétées par d'autres critères, collectés en routine dans les fermes.

Rédaction : S. Minery (Institut de l'Élevage), en collaboration avec A. Fischer (Institut de l'Élevage/INRA), J. Jurquet, B. Rouillé (Institut de l'Élevage) et N. Ballot (CNIEL)
Remerciements à : P. Favardin (INRA), D. Lesage (CNIEL) et M.-P. Jacquaroud (Institut de l'Élevage)
Conception : Institut de l'Élevage - Mise en page : M.-T. Gomez (Institut de l'Élevage) - Crédit photo : C. Helsly/CNIEL
Édité par : Institut de l'Élevage - Ref : 0016 201 040
ISBN : 978-2-36343-788-4 - Avril 2017



RÉSUMÉ

ABSTRACT

Etude de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire de la vache laitière

L'amélioration de l'efficacité alimentaire des animaux peut contribuer à un élevage plus durable par la réduction des ressources utilisées et des rejets associés. Les caractères qui déterminent l'efficacité alimentaire des vaches laitières restent mal identifiés. Le projet se propose donc d'identifier les facteurs biologiques associés à la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire des vaches laitières. La variation d'efficacité alimentaire a été estimée avec l'ingéré résiduel, classiquement défini comme la variabilité résiduelle de l'énergie nette ingérée corrigée pour l'énergie nette du lait, l'entretien et les variations de réserves corporelles. Cet ingéré résiduel inclut par définition toutes les erreurs de mesure. Pour réduire ces erreurs, la note d'état corporel, qui classiquement se fait par notation visuelle, a été automatisée et de nombreux autres caractères candidats ont été mesurés fréquemment dans un environnement stable sur quasiment toute la lactation. La variabilité de l'ingéré résiduel ne représentait que 8% de la variabilité de l'ingéré mesuré, dont 58,9% étaient associés à de l'efficacité et non de l'erreur. L'étude de la répétabilité de cet ingéré résiduel au cours de la lactation suggère d'éviter les 7 premières quinzaines au profit du milieu de lactation. Parmi tous les caractères mesurés, le comportement alimentaire, la température ruminale, la variation des réserves corporelles et l'activité expliquaient 58,9% de la variabilité de l'ingéré résiduel. Les effets de plusieurs de ces caractères semblent confondus. Leur lien de causalité avec l'efficacité reste à étudier notamment pour les fonctions de digestion, d'activités et de gestion des réserves corporelles.

Mots-clés : énergie résiduelle, lactation, note d'état corporel, élevage de précision

Study of the between-cows variability of feed efficiency in dairy cows

Achieving higher feed efficiency of animals is expected to improve animal production sustainability through reduction of the used resources and of the associated emissions. The traits determining feed efficiency remain poorly understood. The present project aimed therefore at identifying the biological factors associated with feed efficiency differences in lactating dairy cows. Feed efficiency variation was estimated with the traditional residual intake, which was defined as the residual variability of net energy intake which is not explained by net energy required for lactation, maintenance and body reserves change. This residual intake includes by definition all measurement errors. To reduce these errors, body condition score, which is commonly measured visually, has been automated and several other candidate traits were measured frequently in a steady environment for almost whole lactation. Residual intake variability represented only 8% of intake variability in our study, among which only 58.9% were found to be associated with feed efficiency variability and not to errors. The repeatability analysis of the residual intake throughout the lactation suggested to avoid the 7 first lactation fortnights, and rather to focus on lactation middle. Among all measured traits, feeding behaviour, rumen temperature, body reserves change and activity explained 58.9% of residual intake variability. Many of these traits seemed confounded with others, which claimed for the need for further work to properly define their causal relationship with feed efficiency, especially focussing on digestion, body reserves change and activity functions.

Keywords: residual energy intake, lactation, body condition score, precision livestock farming



AGROCAMPUS OUEST • Institut supérieur des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
65 rue de Saint-Brieuc - CS84215 - F-35042 Rennes Cedex
Tél. : 02 23 48 50 00
www.agrocampus-ouest.fr

